

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**OPTIMIZACIJA ORGANSKOG RANKINEOVOG
CIKLUSA U GEOTERMALNIM ELEKTRANAMA S
BINARNIM CIKLUSOM**

Diplomski rad

Diego Longin

N-212

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu

Diplomski rad

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

OPTIMIZACIJA ORGANSKOG RANKINEOVOG CIKLUSA U GEOTERMALNIM ELEKTRANAMA S BINARNIM CIKLUSOM

DIEGO LONGIN

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U geotermalnim ležištima gdje su temperature nedovoljne za nastajanje pare, za proizvodnju električne energije koriste se geotermalne elektrane s binarnim ciklusom. Ovakav tip elektrane radi na principu da geotermalni fluid u izmjenjivaču topline prenosi svoju toplinu na sekundarni (radni) fluid koji najčešće ima točku isparavanja nižu od 100°C. Taj je termodinamički ciklus poznat kao organski Rankineov ciklus (ORC). U diplomskom radu napravljena je analiza rada pet radnih fluida u organskom Rankineovom ciklusu. Svaki radni fluid, ovisno o svojim termodinamičkim svojstvima, prikazuje različite učinkovitosti rada u ciklusu.

Ključne riječi: geotermalna energija, organski Rankineov ciklus, radni fluid, binarni ciklus, geotermalni fluid, kritična temperatura, kritični tlak, ireverzibilnost, učinkovitost

Diplomski rad sadrži: 57 stranica, 8 tablica, 21 sliku i 18 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Luka Perković, docent RGNF
Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF

Datum obrane: 19. siječnja 2018., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

OPTIMIZATION OF THE ORGANIC RANKINE CYCLE IN GEOTHERMAL POWER PLANTS WITH A BINARY CYCLE

DIEGO LONGIN

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

In geothermal reservoirs where temperatures are insufficient to generate vapor, geothermal power plants with binary cycle are used for the production of electrical energy. This kind of power plant works in such a way that the geothermal fluid in the heat exchanger transfers its heat to the secondary (working) fluid that most often has a boiling point lower than 100°C. This thermodynamic cycle is known as the organic Rankine cycle (ORC). In this Master's thesis, the work of five working fluids in the organic Rankine cycle is analyzed. Each working fluid, depending on its thermodynamic properties, shows different cycling performance.

Keywords: geothermal energy, organic Rankine cycle, working fluid, binary cycle, geothermal fluid, critical temperature, critical pressure, irreversibility, efficiency

Thesis contains: 57 pages, 8 tables, 21 figures and, 18 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD

Reviewers: Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD
Assistant Professor Luka Perković, PhD
Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD

Date of defense: January 19, 2018., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

Zahvala:

Zahvaljujem se svom mentoru dr. sc. Tomislavu Kureviji na stručnim savjetima i podršci pri izradi diplomskog rada.

Najveću zaslugu za ono što sam postigao pripisujem svojim roditeljima, koji su uvijek bili uz mene, bez obzira dali se radilo o sretnim ili teškim trenucima i bez kojih sve ovo što sam dosad postigao ne bi bilo moguće.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. VAŽNOST OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE	3
3. VRSTE GEOTERMALNIH LEŽIŠTA	5
4. PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ GEOTERMALNIH LEŽIŠTA	8
4.1. Povijest proizvodnje električne energije iz geotermalnih ležišta.....	8
4.2. Proizvodnja geotermalne električne energije u EU	10
4.3. Vrste geotermalnih elektrana	11
4.3.1. Geotermalne elektrane s jednostrukim isparavanjem	11
4.3.2. Geotermalne elektrane s dvostrukim isparavanjem.....	12
4.3.3. Geotermalne elektrane s binarnim ciklusom	13
5. TERMODINAMIKA RANKINEOVOG CIKLUSA	16
5.1. Dostupna energija niskotemperaturnih ležišta	17
5.2. Uvjeti učinkovitog rada Rankineovog ciklusa.....	19
5.3. Optimizacija Rankineovog ciklusa	22
5.4. Analiza ireverzibilnosti Rankineovog ciklusa	31
5.5. Analiza rada radnih fluida u Rankineovom ciklusu.....	34
6. IZRAČUN SNAGE ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE NA GEOTERMALNIM POLJIMA VELIKA CIGLENA, REČICA I KUTNJAK UZ PRIMJENU BINARNOG CIKLUSA	43
6.1. Velika Ciglena	43
6.2. Kutnjak-Lunjkovec	47
6.3. Rečica.....	50
7. GEOTERMALNI POTENCIJAL PLINSKIH I PLINSKO KONDENZATNIH LEŽIŠTA U HRVATSKOJ	53
8. ZAKLJUČAK	54
9. POPIS LITERATURE	56

POPIS TABLICA

Tablica 1-1. Klasifikacija geotermalnih ležišta prema njihovoj temperaturi.....	2
Tablica 4-1. Prikaz instaliranih i neto kapaciteta geotermalnih elektrana [MW] u EU u 2014. i 2015. godini.....	10
Tablica 5-1. Termodinamička svojstva radnih fluida.....	21
Tablica 5-2. Rezultati analize rada radnog fluida R-22.....	30
Tablica 5-3. Karakteristične vrijednosti određenih komponenti radnih fluida potrebnih za izračun optimalne temperature geotermalnog fluida	42
Tablica 6-1. Interna potrošnja elektrane	46
Tablica 6-2. Interna potrošnja elektrane	49
Tablica 7-1. Podatci o ključnim veličinama za izračun snage geotermalnih ležišta	53

POPIS SLIKA

Slika 4-1. Parni stroj u Larderellu koji je proizvodio struju za 5 žarulja	9
Slika 4-2. Shema geotermalne elektrane s jednostrukim isparavanjem	12
Slika 4-3. Shema geotermalne elektrane s dvostrukim isparavanjem	13
Slika 4-4. Shema rada geotermalne elektrane s binarnim ciklusom.....	14
Slika 4-5. Suhi, mokri i izentropni fluidi u T-S dijagramu	15
Slika 5-1. Komponente organskog Rankineovog ciklusa.....	16
Slika 5-2. Ovisnost specifične energije o temperaturi geotermalnog fluida.....	19
Slika 5-3. Rankineov ciklus radnog fluida R-22 pri radnom tlaku ciklusa od 31 bar, prikazan u T-S dijagramu	24
Slika 5-4. Rankineov ciklus radnog fluida R-22 pri radnom tlaku ciklusa od 50 bara prikazan u T-S dijagramu	28
Slika 5-5. Rankineov ciklus radnog fluida R-22 pri radnom tlaku ciklusa od 59 bara prikazan u T-S dijagramu	29
Slika 5-6. Rankineov ciklus radnog fluida R-22 pri radnom tlaku ciklusa od 79 bara prikazan u T-S dijagramu	30
Slika 5-7. Ireverzibilnost pojedinih komponenti sustava u funkciji radnog tlaka sustava za radni fluid R-22, pri temperaturi geotermalnog fluida od 150°C i temperaturi okoline od 30°C	33
Slika 5-8. Rankineov ciklus amonijaka pri tlaku sustava od 45 bara	35
Slika 5-9. Rankineov ciklus fluida R-114	36
Slika 5-10. Rankineov ciklus fluida R-134a i RC-318 u nadkritičnim uvjetima pri temperaturi geotermalnog fluida od 150°C	38
Slika 5-11. Ukupni stupanj iskorištenja, η_u , kao funkcija temperature geotermalnog fluida.....	39

Slika 5-12. Korelacija između potrebne količine topline iznad kritične temperature za optimalnu učinkovitost iskorištavanja ležišta i funkcije reducirane specifične topline stanja idealnog plina	41
Slika 6-1. Rankineov ciklus fluida R-134a pri temperaturi geotermalnog fluida 165°C i temperaturi okoline od 10,2 °C.....	45
Slika 6-2. Rankineov ciklus fluida R-134a pri temperaturi geotermalnog fluida 140°C i temperaturi okoline od 10,3 °C.....	48
Slika 6-3. Rankineov ciklus fluida R-22 pri temperaturi geotermalnog fluida 110°C i temperaturi okoline od 11,6 °C.....	51
Slika 8-1. Učinkovitost iskorištavanja ležišta u ovisnosti o temperaturi geotermalnog fluida.....	55

POPIS OZNAKA

W_{net}^{max} - maksimalni koristan rad niskotemperaturnih ležišta, J

ΔH - razlika u specifičnoj entalpiji geotermalnog fluida na ušću bušotine i pri standardnim uvjetima okoline, J/kg

ΔB - promjena raspoloživosti geotermalnog fluida,

ΔS - razlika u entropiji geotermalnog fluida na ušću bušotine i pri uvjetima okoline, J/kgK

T_0 - temperatura okoline, K

T_{gf} - temperatura geotermalnog fluida, K

T_{gin} - temperatura geotermalnog fluida na ulazu u izmjenjivač topline, K

T_{gout} - temperatura geotermalnog fluida na izlazu iz izmjenjivača topline, K

T_{wf} - temperatura radnog fluida, K

T_{ex} - temperatura radnog fluida na izlazu iz turbine, K

T^* - optimalna temperatura geotermalnog ležišta, °C

T_C - kritična temperatura radnog fluida, °C

T_b - temperatura isparavanja, °C

p_{gf} - tlak geotermalnog fluida, bar

p_0 - tlak okoline, bar

p_B - tlak radnog fluida u točki B, bar

p_{To} - tlak radnog fluida pri temperaturi kondenzacije, bar

c_p - specifični toplinski kapacitet, J/kgK

c_{pgf} - specifični toplinski kapacitet geotermalnog fluida, J/kgK

c_p^*/R - specifična toplina stanja idealnog plina

h_{fg} - entalpija isparavanja, J/kg

H_A –vrijednost specifične entalpije radnog fluida u točki A, J/kg

H_E – vrijednost specifične entalpije radnog fluida u točki E, J/kg

H_B - vrijednost specifične entalpije radnog fluida u točki B, J/kg

H_C – vrijednost specifične entalpije radnog fluida u točki C, J/kg

S_B - vrijednost entropije radnog fluida u točki B, J/kgK

η_u - ukupni stupanj učinkovitosti sustava,

$\eta_{t,dry}$ - učinkovitost rada turbine sa suhom fazom

η_{cycle} - termodinamički stupanj učinkovitosti

η_t - učinkovitost rada turbine

q_{gf} - protok geotermalnog fluida, l/s

q_{wf} - protok radnog fluida, l/s

W_p - rad pojne pumpe, J

W_t - rad turbine, J

Q_{rej} - ukupna količina topline uklonjena iz ciklusa, J

P_{neto} - neto snaga, kW

E_{neto} - neto proizvedena energija, MWh

P_{bruto} - bruto snaga, kW

I - ireverzibilnost komponenti sustava, kJ/kg

γ - omjer specifičnog toplinskog kapaciteta pri stalnom tlaku i specifičnog toplinskog kapaciteta pri stalnom volumenu

β - godišnji stupanj iskorištenja elektrane, %

x - udio kapljevite faze u turbini

1. UVOD

Geotermalna ležišta mogu se definirati kao toplinski spremnici ispod površine zemlje iz kojih toplina može biti proizvedena i kasnije se ekonomski upotrebljavati za proizvodnju električne energije ili izravno koristiti kao toplinska energija u industriji, domaćinstvu ili poljoprivredi. Geotermalno ležište može sadržavati toplinu u stijenama kao i u fluidima koji ispunjavaju pore tih stijena. Procjene geotermalnih rezervi se rade na temelju geoloških i geofizičkih podataka kao što su: dubina, debljina i površina ležišta, svojstva stijena, salinitet fluida, kemijska svojstva fluida, temperatura, propusnost i poroznost stijena. Rezerve su potvrđene na temelju detaljnih podataka dobivenih dubokim bušenjem u područje potencijalnog ležišta. Zbog toga su cijena bušenja i kvaliteta podataka o svojstvima ležišnih stijena glavni čimbenici u procjenjivanju rezervi. Radioaktivni raspad izotopa kalija, urana i torija neprestano stvara toplinu unutar Zemlje. Količina topline sadržane u Zemlji se procjenjuje na 1.3×10^{31} J. Geotermalni gradijenti na Zemlji se kreću od $10^{\circ}\text{C km}^{-1}$ do $60^{\circ}\text{C km}^{-1}$ (Gupta i Roy, 2007). Temperature u ležištima dubine 2 do 3 kilometara u pravilu nisu veće od 100°C i elektrane koje bi radile s fluidima tih temperatura imale bi nisku termodinamičku učinkovitost i ne bi bile ekonomski isplative. Nedavni napredak tehnologije binarnog ciklusa geotermalnih elektrana omogućuje učinkovito korištenje ležišta srednjih temperatura (Tablica 1-1.). Uz napredak tehnologije bušenja za geotermalna ležišta, izrada bušotina većih od 5 km može biti ekonomski isplativa i temperature reda veličine $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ mogu biti dosegnute. Nije dovoljno samo doći do vruće stijene, osim toga potrebno je proizvesti geotermalni fluid, a za to treba postojati dovoljno pora i pukotina kako bi geotermalni fluid mogao cirkulirati. Na većim dubinama pokrovne stijene svojom težinom teže zatvaranju pora i pukotina smanjujući propusnost. Stoga, iako vruće stijene na određenim dubinama postoje gotovo svugdje u Zemlji, trenutno stanje tehnologije i geološke prepreke onemogućuju ekonomski isplativu proizvodnju geotermalne energije na velikim dubinama u većini područja na Zemlji. Međutim, u nekim geološkim područjima kao što su granice tektonskih ploča ili ponekad unutar granica tektonskih ploča (npr. aktivni i geološki mladi vulkani povezani s vrućim točkama plašta kao što su Havaji) toplina može biti prenesena lokalno unutar nekoliko kilometara Zemljine kore kroz proces konvekcije magme i rastaljenih stijena. Magma ima temperaturu oko 1000°C i u interakciji je sa stijenama blizu površine Zemlje uzrokujući površinsko pokazivanje geotermalnih aktivnosti u obliku vrućih vrela, gejzira i fumarola. Pod određenim povoljnim geološkim uvjetima, toplina ostaje zarobljena ispod površine

stvarajući geotermalno ležište. U takvim područjima bušenjem u rasponu nekoliko stotina metara dolazi se do temperatura u rasponu od 200°C-300°C i takve regije su vrlo povoljne za iskorištavanje geotermalnih izvora. Najveća geotermalna polja u svijetu proizvode geotermalnu energiju baš iz ovakvih geoloških struktura (Gupta i Roy, 2007). Geotermalna energija u Europi trenutno zauzima mali udio od ukupne energije pridobivene iz obnovljivih izvora energije. Jedan od ciljeva svake zemlje trebala bi biti energetska neovisnost, a geotermalna ležišta idealan su resurs za domaću proizvodnju električne energije. Osim energetske neovisnosti, izgradnjom geotermalnih elektrana s binarnim ciklusom smanjila bi se potrošnja fosilnih izvora energije, a samim time i učinci globalnog zatopljenja.

Uz pomoć računalnog programa Microsoft Excel rađeni su grafovi u ovom radu.

Tablica 1-1. Klasifikacija geotermalnih ležišta prema njihovoj temperaturi (Williams et al, 2011)

Temperatura ležišta	
<100°C	niskotemperaturna
100-200 °C	srednjetemperaturna
>200°C	visokotemperaturna

2. VAŽNOST OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE

Razvoj energetskog sektora ovisi o čimbenicima koji nisu direktno povezani s energetskom industrijom. Ti čimbenici uključuju razvoj stanovništva, broj kućanstava, ekonomske trendove, tehnološki razvoj, političko okruženje. Poznate rezerve fosilnih izvora i nuklearnih goriva 2012. godine iznosile su 35 000 PJ ($1 \text{ PJ} = 10^{15} \text{ J}$). Ovaj iznos jednak je 90 puta primarnoj potrošnji energije u svijetu 2007. godine. Ugljen i lignit čine 60% tih rezervi, iz dostupnih podataka procjenjuje se da obzirom na potrošnju energije iz 2007. godine, rezervi nafte ima za još 42 godine, prirodnog plina za 51 godinu, ugljena za 129 godina i lignita za 286 godina (Stober i Bucher, 2013). Ove podatke treba uzeti sa zadržkom jer su to samo procjene podataka koji su bili dostupni u tim trenucima. Stvarne zalihe resursa neizravno ovise o cijeni koju su potrošači spremni platiti za njih. Riječ je o tržištu na koje utječu cijene konkurentnih energenata i stanje tehnologije u tom trenutku. Fosilni izvori sigurno imaju određeni rok potrošnje jer su to resursi koji nastaju geološkim procesima koji su puno sporiji nego što ih ljudi eksploatiraju i troše. U zadnjih 50 godina ukupna potrošnja energije se znatno povećala eksponencijalno rastom svjetske populacije. Mnogi izvori predviđaju povećanje svjetske populacije sa današnjih 7,5 na 10 milijardi stanovnika u sljedećih 50 godina. U 2015. godini ukupna godišnja potrošnja energije po stanovniku u SAD-u iznosila je 280 GJ. Ako u budućnosti 10 milijardi stanovnika Zemlje bude imalo mogućnost korištenja energije kao stanovnici SAD-a u 2015. godini, rezerve iz 2012. godine će se "potrošiti" za 12 godina. Teško je za očekivati da će u budućnosti svaki stanovnik Zemlje trošiti energije kao prosječni stanovnik SAD-a 2015. godine, ali ova mala poveznica ukazuje na to da se obnovljivi izvori energije moraju početi drastično razvijati ako je visoki životni standard cilj svim stanovnicima Zemlje. Paralelno s razvojem obnovljivih izvora energije, energija se mora početi koristiti učinkovitije, gubitci u energetskim pretvorbama trebaju biti smanjeni, energiju treba štedjeti. Energetska učinkovitost zahtijeva nove inovativne tehnologije, a one zahtijevaju vrijeme i novac. U posljednjih nekoliko godina, globalno zatopljenje i povećanje srednje godišnje temperature glavna je briga čovječanstva. Očigledno je da je glavni uzrok globalnog zatopljenja izgaranje fosilnih izvora energije koji ispuštaju ugljikov dioksid i ostale stakleničke plinove u atmosferu. Učinci stakleničkih plinova doprinose s više od 50% promatranog globalnog zatopljenja, a osim stakleničkih plinova neki od uzročnika su krčenje šuma, toplinska inercija oceana, upotreba gnojiva koja sadrže dušik. Mnogo je neželjenih i dugoročno vrlo skupih učinaka globalnog zatopljenja. Učinci uključuju izumiranje nekih

vegetacija, odmrzavanje permafrosta, topljenje kontinentalnih ledenih kapa, topljenje ledenih naslaga u alpskom području i povećanje učestalosti ekstremnih vremenskih uvjeta. Rad elektrana i sustava za proizvodnju koji koriste obnovljive izvore energije poput fotonaponskih, hidroelektričnih i geotermalnih je potpuno ili gotovo bez emisija stakleničkih plinova. Obnovljivi izvor energije nisu samo od izuzetne važnosti zbog čuvanja i zamjene fosilnih izvora energije nego i zbog očuvanja okoliša. Ciljevi politike zaštite okoliša mnogih zemalja uključuju značajno povećanje korištenja obnovljivih izvora energije za proizvodnju električne energije. Također se ulažu veliki naponi za poboljšanje energetske učinkovitosti postojećih elektrana koje koriste obnovljive izvore energije. To dovodi do smanjenja uvoza energije i energenata, poboljšanju fleksibilnost sustava opskrbe energijom i povećanje sigurnosti opskrbe energijom (Stober i Bucher, 2013).

3. VRSTE GEOTERMALNIH LEŽIŠTA

Uvjeti za postojanje geotermalnog ležišta su: a) velik izvor topline, b) geološka formacija za akumuliranje topline i c) barijera za zadržavanje akumulirane topline. Postoji niz geoloških čimbenika koji rezultiraju različitim vrstama geotermalnih ležišta. Prema tome, svako geotermalno ležište je različito, ali zbog nekih određenih zajedničkih karakteristika, geotermalna ležišta mogu se podijeliti u sljedeće kategorije: ležišta dominantne pare, ležišta vruće vode, geotlačna ležišta i ležišta s vrućim i suhim stijenama (Gupta i Roy, 2007).

1) Ležišta s dominantnom parom

Većina danas iskorištavanih geotermalnih ležišta sadrži vodu pod visokim tlakom i temperaturom višom od 100°C. Kada se ova voda dovede na površinu, tlak se znatno smanjuje stvarajući tako velike količine pare pa tako nastaje smjesa zasićene pare i vode. Omjer proizvedene pare i vode razlikuje se od lokacije do lokacije. Neka od najpoznatijih geotermalnih ležišta na svijetu pripadaju ovoj kategoriji: CerroPrieto (Meksiko), Wairakei (Novi Zeland), Reykjavik (Island), Saltonovo more (SAD). Budući da se iz ovih ležišta proizvodi mješavina pare i vode, ova se ležišta nazivaju ležišta s mokrom parom. Druga važna geotermalna ležišta kao što su Larderello (Italija) i Geysers (SAD) proizvode pregrijanu paru bez tekuće faze, takva ležišta nazivaju se ležišta suhe pare. Osnovni zahtjev ležišta s dominantnom parom su dovoljne zalihe vode uz prije spomenute uvjeta za postojanje geotermalnog ležišta.

2) Ležišta vruće vode

U ležištima vruće vode, struja vode procesom konvekcije prenosi toplinu iz dubokih dijelova Zemlje do ležišta koja su na relativno malim dubinama. Ležište se također može zagrijavati i kondukcijom vrućih stijena s kojima je u dodiru. Ova ležišta se razlikuju od ležišta s dominantnom parom u činjenici da je u ovim ležištima fluid kontinuirana tekuća faza. Obično je temperatura ovih ležišta u rasponu od 60°C-100°C, a dubina ležišta od 1500-3000 metara. Geotermalno ležište vruće vode može se razviti i bez izolacijskih pokrovnih stijena uz uvjet da su geotermalni gradijent i dubina vodonosnika dovoljno visoki za uspostavljanje konvektivne cirkulacije fluida. Kada je geološka struktura takva da ležište nema

izolacijskih pokrovnih stijena, temperatura vode u gornjem djelu ležišta ne može premašiti temperaturu isparavanja pri atmosferskom tlaku jer se zbog konvekcijskog prijenosa topline fluidu smanjuje tlak i miješa se s hladnom podzemnom vodom. Ovisno o temperaturi, kemizmu i strukturi ležišta, ležišta vruće vode podijeljena su na nekoliko tipova:

- a) Sustavi s temperaturom ležišta 50-150°C i proizvodnjom vode kemijskog sastava sličnog kao površinske ili plitke podzemne vode.
- b) Sustavi koji u sebi sadrže određeni volumen vode koja nije oborinskog podrijetla, kemijski sastav joj se razlikuje od površinskih i plitkih podzemnih voda.
- c) Sustavi koji sadrže vodu izrazito visokog saliniteta. Kemijski sastav takvih voda može se usporediti s vodom iz Crvenog i Saltonovog mora.
- d) Sustavi karakterizirani s pokrovnim izolacijskim stijenama koje su posljedica prirodnih geoloških procesa. Geotermalna ležišta ovakvog tipa imaju pokrovne stijene koje se pojavljuju kao sitnozrnate, slabo propusne naslage.
- e) Sustavi karakterizirani vlastitim stvaranjem pokrovnih izolacijskih naslaga, pokrovne naslage nastaju kao posljedica geokemijskih promjena i taloženja sedimenata koji zatvaraju pukotine stijena koje nadliježu geotermalno ležište. Wairakei (Novi Zeland) i Yellowstone Park (Wyoming) su tipični primjeri.

3) Geotlačna geotermalna ležišta

Vrsta hidrotermalnog sustava čija je vruća voda potpuno izolirana od utjecaja okolnih stijena zove se geotlačni sustav. Takvi sustavi obično nastaju u sedimentnim bazenima gdje taloženje sedimenata i popunjavanje pukotina okolnih stijena traje jako kratko što rezultira visokim tlakovima fluida zarobljenog u takvoj geološkoj strukturi (Gupta i Roy, 2007).

4) Vruće i suhe stijene

Kod ovog tipa ležišta toplina je pohranjena u vrućim i slabo propusnim stijenama na relativno plitkim dubinama unutar Zemljine kore bez prisutnosti fluida za pohranu i prijenos topline. Za iskorištavanje ovakvih vrsta ležišta potrebno je izraditi dovoljno duboke bušotine i provesti postupak hidrauličkog frakturiranja kako bi se stvorile pukotine unutar ležišta koje bi imale ulogu izmjenjivača topline. Voda bi se utiskivala kroz utisnu bušotinu, cirkulirala kroz pukotine, preuzimala

toplinu stijena i proizvodila kroz proizvodnu bušotinu. Procijenjeno je da se hlađenjem 1m^3 vruće stijene za 100°C može omogućiti rad geotermalne elektrane snage 30 MW u razdoblju od 30 godina (Gupta i Roy, 2007). Ipak, postupak hidrauličkog frakturiranja i kontrola gubitaka cirkulacije vode u ležištu predstavljaju najveće tehnološke prepreke u proizvodnji geotermalne energije iz vrućih i suhih stijena.

4. PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ GEOTERMALNIH LEŽIŠTA

Geotermalna ležišta niske entalpije ($T < 150^{\circ}\text{C}$) imaju višestruko veći potencijal za proizvodnju električne energije i mogućnost mnogo šire regionalne distribucije u usporedbi s ležištima visoke entalpije zbog toga što su rasprostranjenija i nalaze se na manjim dubinama. Dostupni resursi su višestruko veći u usporedbi s potražnjom za električnom energijom u svijetu, koja će se, očekuje se, udvostručiti u naredna tri desetljeća (Chandrasekharan i Bundschuh, 2008). Samo mali dio ove geotermalne energije se ekstrahira upotrebom današnje tehnologije. U usporedbi s ostalim obnovljivim izvorima energije, geotermalni resursi omogućuju mnogo učinkovitiju i stabilniju potražnju za energijom. Geotermalna energija je uz sunčevu energiju i energiju vjetra slobodno dostupna čovječanstvu i način da ju se iskoristi za poboljšanje života na Zemlji leži u rukama onih koji je trebaju. Kontinuirani razvoj tehnika bušenja i proizvodnje energije čini geotermalne izvore srednje temperature najboljom opcijom za zadovoljavanje buduće potražnje za električnom energijom. Također će jamčiti energetske sigurnost i energetske neovisnost razvijenih zemalja i zemalja u razvoju, a istodobno će se smanjiti emisija stakleničkih plinova, čime će se ublažiti globalne klimatske promjene.

4.1. Povijest proizvodnje električne energije iz geotermalnih ležišta

Korištenje geotermalnog fluida za energetske pretvorbe počelo se koristiti u drugoj polovici 19. stoljeća nakon što se znanost o termodinamici počela razvijati. Termodinamika je pokazala put kako učinkovito pretvoriti energiju iz vruće pare prvo u mehanički rad, a potom u električnu energiju uz pomoć turbine i generatora. Razvoj proizvodnje električne energije iz geotermalnih izvora započinje u regiji Larderello u Toskani (Stober i Bucher, 2013). Godine 1904. prvi put je proizvedena električna energija iz geotermalnog izvora spajanjem generatora i parnog stroja u Larderellu (Slika 4-1.). 1913. godine puštena je u proizvodnju prva geotermalna elektrana u Larderellu snage 250 kW, već 1915. godine elektrana je imala snagu 15 MW, a izvor energije bila je suha para. Od 1931. godine počele su se bušiti nove bušotine koje su proizvodile pregrijanu paru temperature od 200°C . Danas je ukupna instalirana snaga u Larderellu 790 MW što je 90% od ukupne instalirane snage za proizvodnju električne energije iz geotermalnih izvora u EU. 1920. godine na Islandu je započelo korištenje energije iz geotermalnih izvora i Island

je danas broj jedan u iskorištavanju geotermalne energije u svijetu jer 65% potrošnje primarne energije dolazi iz geotermalnih izvora energije (Stober i Bucher, 2013).



Slika 4-1. Parni stroj u Larderellu koji je proizvodio struju za 5 žarulja (Stober i Bucher, 2013)

Nakon uspjeha u Italiji i na Islandu, nekoliko zemalja je slijedilo njihov primjer pa je tako Novi Zeland 1958. godine pustio u rad geotermalnu elektranu u Wairakeiu, a 1960. godine pokrenut je projekt geotermalnih elektrana Geysers u Kaliforniji. Prva binarna geotermalna elektrana napravljena je 1967. godine u blizini grada Petropavlovsk na poluotoku Kamčatka u Rusiji. Imala je snagu 670 kW i opskrbljivala je električnom i toplinskom energijom maleno selo u blizini (Chiasson, 2016). Nakon Drugog svjetskog rata mnoge zemlje su se privukle geotermalnom energijom obzirom na to da je bila konkurentna ostalim oblicima energije. Nije bilo potrebe za uvozom energije, a u nekim slučajevima to je bio jedini lokalni dostupni izvor energije. Daljnji razvoj geotermalnih elektrana zaustavio se tijekom ekonomske krize i smanjenja cijena nafte, drugim riječima, u razdobljima niskih cijena ugljikovodika ulaganje u geotermalne elektrane nije ekonomski isplativo (Dickson i Fanelli, 1995).

4.2. Proizvodnja geotermalne električne energije u EU

Prema EurObserv'ER-u, instalirani kapacitet geotermalnih elektrana u Europskoj Uniji se povećao za 4 MW u odnosu na 989,6 MW iz 2014. godine i u 2015. iznosi 993.6 MW. Neto kapacitet povećao se za 2 MW te iznosi 837.1 MW. Navedeni podaci prikazani su u Tablici 4-1. Njemačka je jedina zemlja koja je povećala svoj instalirani kapacitet nakon što je geotermalna elektrana snage 4,4 MW Grünwald/Laufzorn puštena u pogon. Italija je i dalje vodeća zemlja u EU s instaliranim kapacitetom od 915 MW.

Tablica 4-1. Prikaz instaliranih i neto kapaciteta geotermalnih elektrana [MW] u EU u 2014. i 2015. godini (EurObserv'ER, 2016)

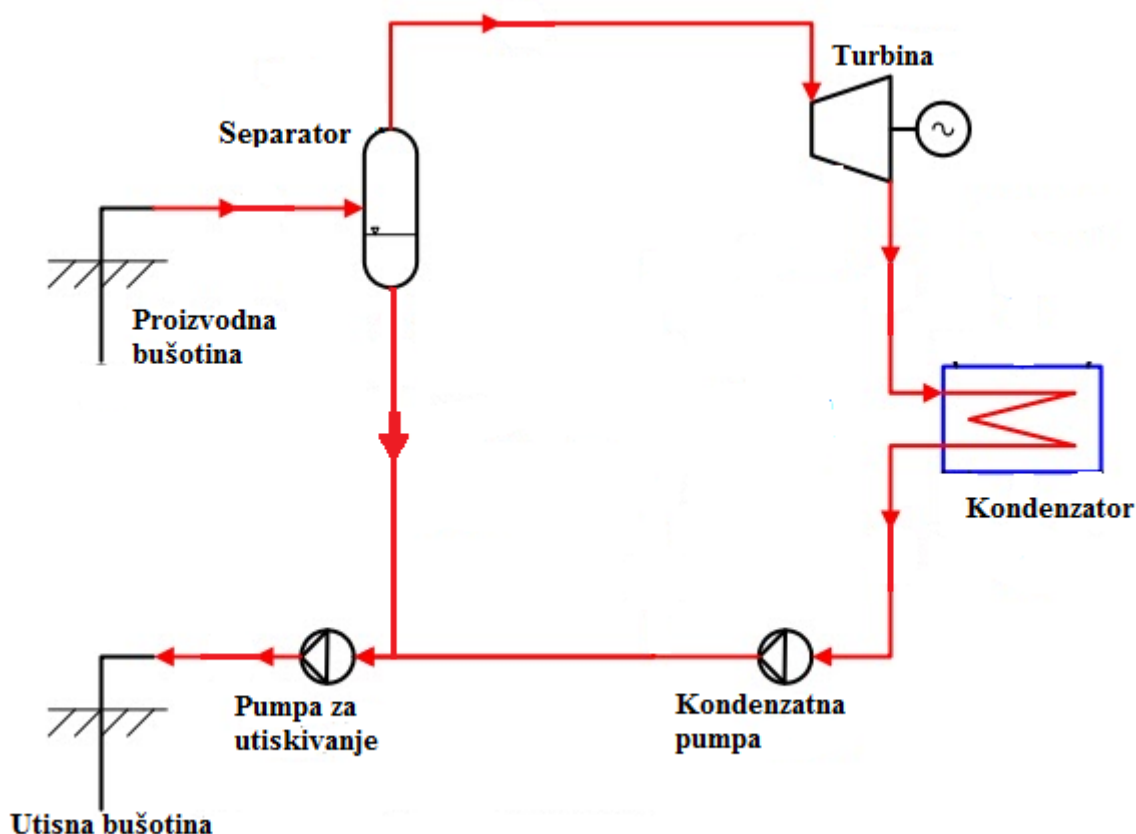
	Instalirani kapacitet (2014)	Neto kapacitet (2014)	Instalirani kapacitet (2015)	Neto kapacitet (2015)
Italija	915.5	768.0	915.5	768.0
Portugal	29.0	25.0	29.0	25.0
Njemačka	27.0	24.0	31.0	26.0
Francuska	17.1	17.1	17.1	17.1
Austrija	1.0	1.0	1.0	1.0
Ukupno EU	989.6	835.1	993.6	837.1

4.3. Vrste geotermalnih elektrana

Način iskorištavanja i izbor tehnologije za proizvodnju geotermalne električne energije najviše ovisi o vrsti ležišta i temperaturi geotermalnog fluida.

4.3.1. Geotermalne elektrane s jednostrukim isparavanjem

Jednostruko isparavanje znači da je fluid prošao samo jedan “flash” proces odnosno postupak prelaska iz stlačene tekućine u smjesu tekućine i pare kao rezultat pada tlaka ispod tlaka zasićenja. “Flash” proces može se javiti na više mjesta: a) u ležištu prilikom strujanja fluida kroz pore s pripadajućim padom tlaka, b) bilo gdje u proizvodnoj bušotini kao rezultat pada tlaka zbog trenja, c) na ulazu u separator kao rezultat naglog pada tlaka zbog prigušenja kontrolnog ventila. Čest je slučaj da se u područjima gdje se “flash” proces u početku odvijao u bušotini, preseli u ležište zbog prirodnog pada tlaka u ležištu. Ponekad se naziv “separirana para” koristi za ovaj tip geotermalnih elektrana zbog načina na koji se para proizvodi. Stvarna lokacija “flash” procesa može biti važna u radu elektrane dok je s gledišta termodinamičke pretvorbe energije to nebitno. Ovaj tip geotermalnih elektrana čini 29% od ukupnog broja geotermalnih elektrana u svijetu (DiPippo, 2012). Na Slici 4-2. je prikazan shema geotermalne elektrane s jednostrukim isparavanjem.



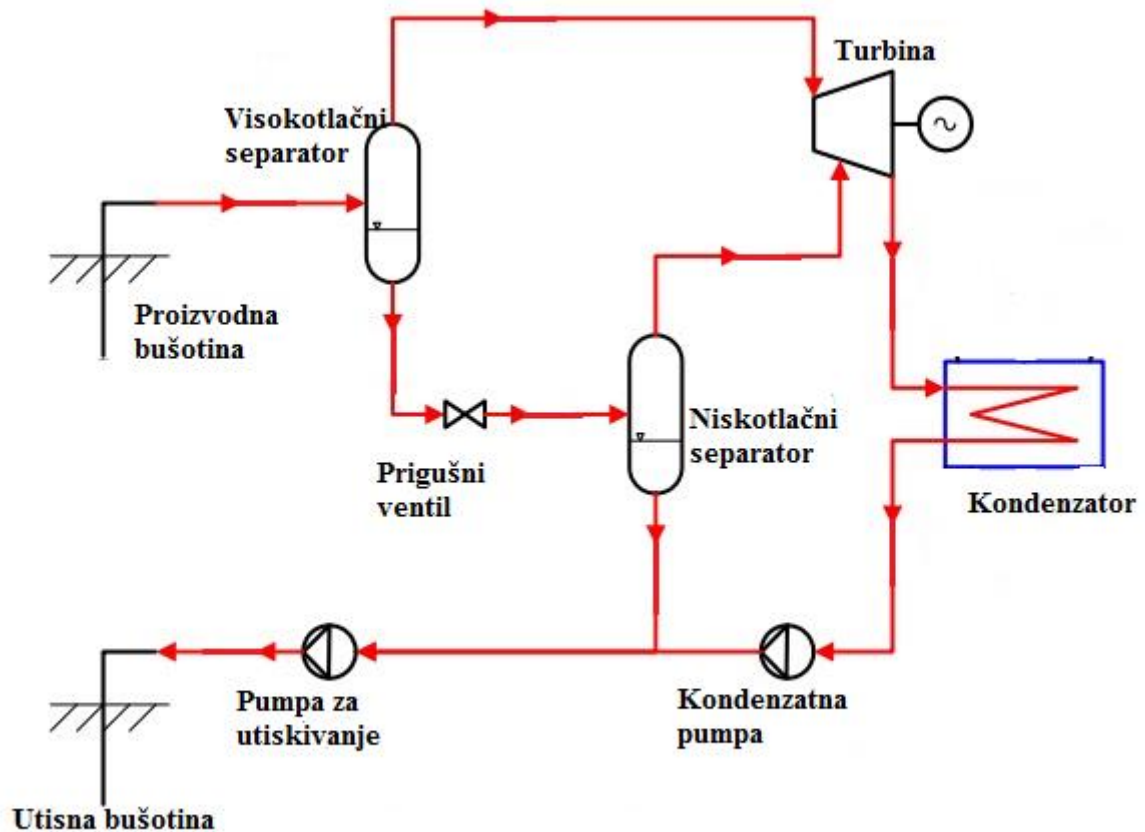
Slika 4-2. Shema geotermalne elektrane s jednostrukim isparavanjem (Valdimarsson, 2011)

Kod ovakvih tipova elektrana para i čestice vode se kroz proizvodnu bušotinu vode do separatora gdje se odvajaju čestice vode i utiskuju natrag u ležište. Izdvojena para se dovodi na lopatice turbine i nakon adijabatske ekspanzije kroz turbinu se kondenzira i vraća natrag u ležište uz pomoć kondenzatne pumpe i pumpe za utiskivanje.

4.3.2. Geotermalne elektrane s dvostrukim isparavanjem

Elektrane s dvostrukim isparavanjem predstavljaju poboljšanje u radu u odnosu na geotermalne elektrane s jednostrukim isparavanjem. Mogu proizvesti 15-25% više električne energije za iste uvjete geotermalnog fluida. Postrojenje je složenije, skuplje i zahtijeva više održavanja, ali veća izlazna snaga često opravdava izradu ovog tipa elektrana. Postrojenje se razlikuje od postrojenja s jednostrukim isparavanjem u tome što je dodan jedan “flash” separator koji zaostalu vruću vodu iz prvog stupnja djelomično

pretvara u paru naglim spuštanjem tlaka. Proizvedena para je nižeg tlaka od pare koja je proizvedena u prvom stupnju te se te dvije pare miješaju u zajedničkoj turbini ili konstrukcija može biti takva da svaka para ima svoju turbinu (DiPippo, 2012). Na Slici 4-3. je prikazana shema rada geotermalne elektrane s dvostrukim isparavanjem.

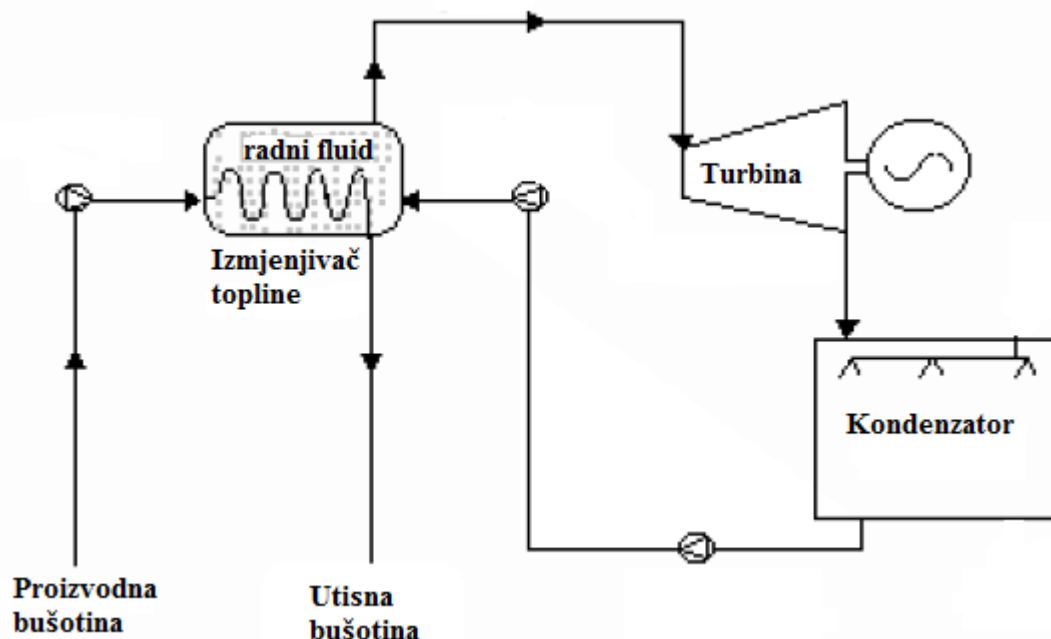


Slika 4-3. Shema geotermalne elektrane s dvostrukim isparavanjem (Valdimarsson, 2011)

4.3.3. Geotermalne elektrane s binarnim ciklusom

U ležištima gdje su temperature nedovoljne za nastajanje pare, za proizvodnju električne energije koriste se geotermalne elektrane s binarnim ciklusom. Binarna postrojenja omogućuju pretvorbu topline iz srednjemetemperaturnih geotermalnih ležišta u električnu energiju. Ovakav tip elektrane radi na principu da geotermalni fluid u izmjenjivaču topline prenosi svoju toplinu na sekundarni (radni) fluid koji najčešće ima točku isparavanja nižu od 100°C. Taj je termodinamički ciklus poznat kao organski Rankineov ciklus (ORC). Nakon preuzimanja topline od geotermalnog fluida u izmjenjivaču topline, radni fluid

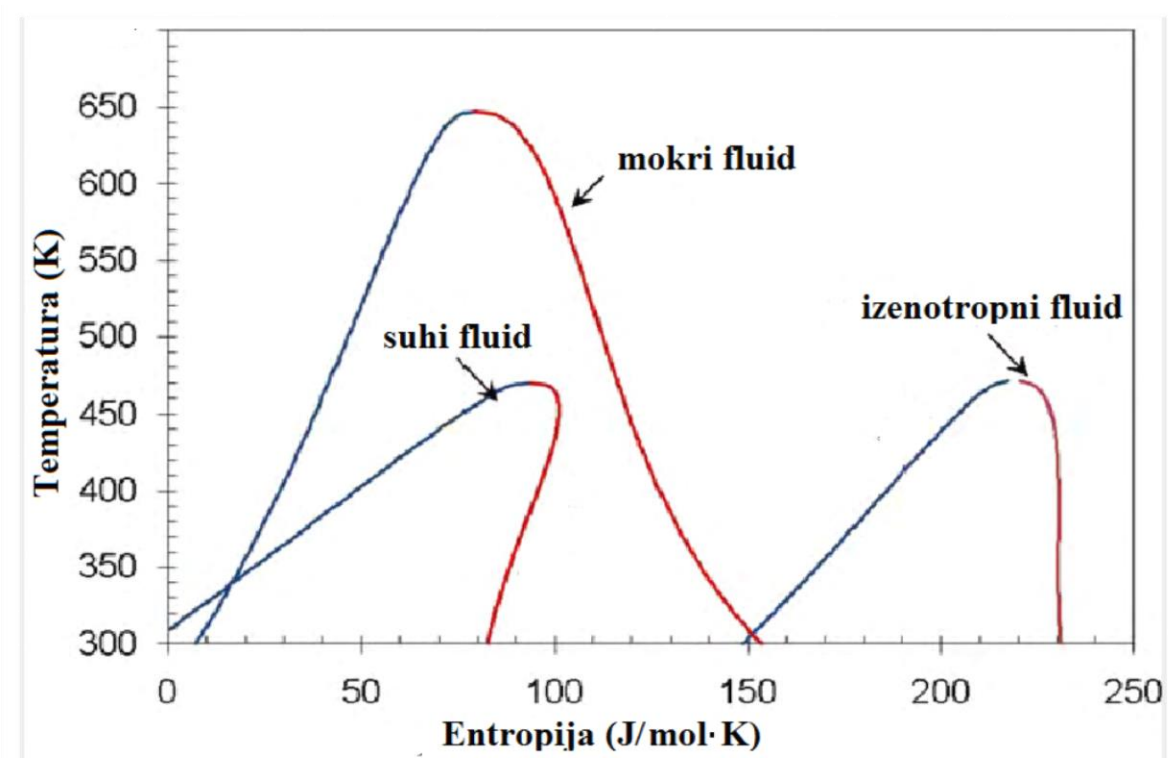
isparava i ulazi u turbinu gdje se na generatoru proizvodi električna energija. Pothlađeni geotermalni fluid nakon izmjenjivača topline se utiskuje natrag u ležište, a radni fluid se nakon ekspanzije u turbini kondenzira te se pojomnom pumpom vraća u izmjenjivač topline. Na Slici 4-4. je prikazana shema rada binarne geotermalne elektrane.



Slika 4-4. Shema rada geotermalne elektrane s binarnim ciklusom (Kurevija i Golub, 2008)

Većina geotermalnih ležišta su u svijetu karakterizirana kao nisko do srednje temperaturna ležišta što znači da su temperature geotermalnog fluida uglavnom manje od 150°C . Pri ovim temperaturama termodinamička učinkovitost pretvorbe geotermalnog fluida u paru je niska i proizvodnja električne energije bila bi ekonomski neisplativa. Binarne geotermalne elektrane, temeljene na organskom Rankineovom ciklusu (ORC) imaju najvišu termodinamičku učinkovitost pri iskorištavanju takvih geotermalnih ležišta za proizvodnju električne energije. Ovaj tip elektrana nema emisija stakleničkih plinova osim vodene pare iz rashladnih tornjeva (samo u slučaju mokrog hlađenja) i nema gubitaka radnog fluida. Nema ekoloških problema koji mogu biti povezani s ispuštanjem stakleničkih plinova poput CH_4 i CO_2 i ispuštanja toksičnih elemenata kao što su Ag i As. Još jedna od prednosti ovih elektrana je da geotermalni fluid ne dodiruje pomične mehaničke dijelove postrojenja kao što je turbina što produljuje njihov radni vijek. Binarne geotermalne elektrane omogućile su iskorištavanje velikog broja geotermalnih ležišta koja su prije bila neisplativa za iskorištavanje čime se značajno povećao razvoj geotermalne energije.

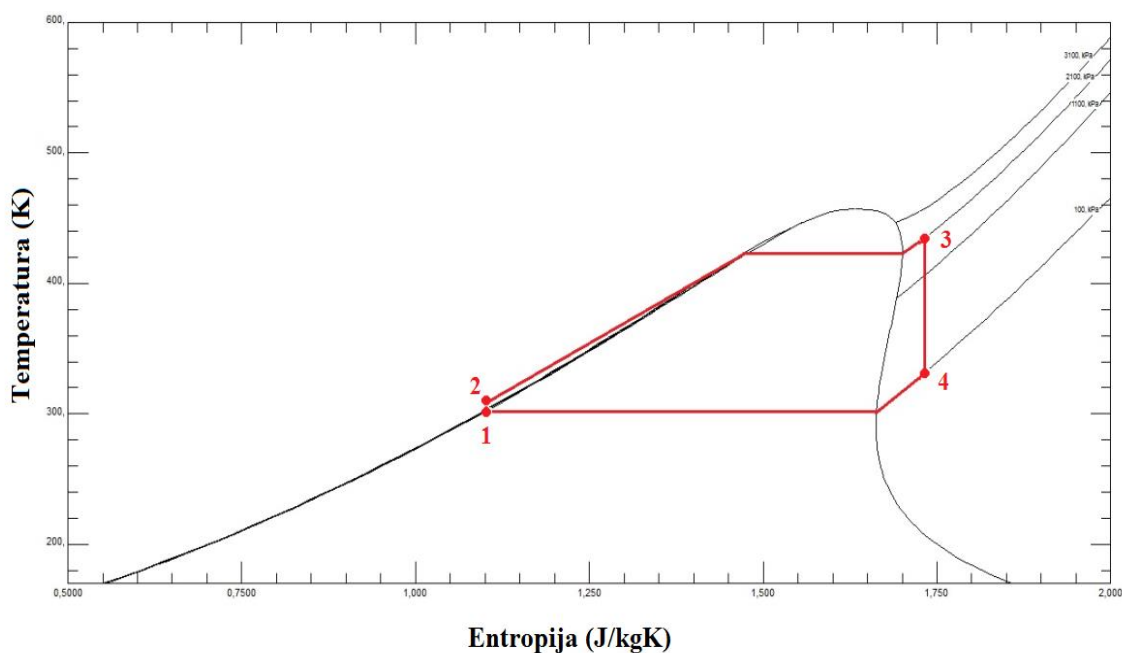
U ovom radu biti će opisano kako pojedini radni fluidi rade pri različitim uvjetima rada. Izbor optimalnog radnog fluida najviše ovisi o temperaturi geotermalnog fluida. Pravilan izbor odgovarajućeg radnog fluida prvi je korak prilikom projektiranja ORC-a. Na temelju tri različite vrste nagiba krivulje zasićene pare u T-S dijagramu (Slika 4-5.) fluidi se razvrstavaju u 3 grupe: 1) suhi fluidi s pozitivnim nagibom (R-114, RC-318), 2) mokri fluidi s pozitivnim nagibom (R-22, R-717), 3) izenotropni fluidi s gotovo vertikalnom krivuljom zasićene pare (R-134a).



Slika 4-5. Suhi, mokri i izenotropni fluidi u T-S dijagramu (Goswami, 2010)

5. TERMODINAMIKA RANKINEOVOG CIKLUSA

Binarni ciklus geotermalne elektrane sastoji se od dva ciklusa: primarnog ciklusa koji sadrži geotermalni fluid i sekundarnog ciklusa koji je zatvoren i u njemu je sadržan radni fluid. Primarni ciklus započinje na proizvodnim bušotinama i završava na utisnim bušotinama. U primarnom ciklusu, temperatura i željeni protok geotermalnog fluida određeni su svojstvima geotermalnog ležišta. U sekundarnom ciklusu (Slika 5-1.) radni fluid ulazi u pumpu u kao zasićena kapljevina (točka 1) i tlači se izenotropno do radnog tlaka isparivača (točka 2). Radni fluid ulazi u isparivač kao stlačena kapljevina i napušta ga u obliku pare (točka 3). Nakon toga para ulazi u turbinu gdje ekspandira izenotropno (od točke 3 do točke 4) i proizvodi rad rotirajući vratilo turbine koje je spojeno na električni generator. U kondenzatoru se para kondenzira pri stalnom tlaku odbacivanjem topline u okolinu (od točke 4 do točke 1). Radni fluid napušta kondenzator kao zasićena kapljevina (točka 1) i ulazi u pumpu, završavajući ciklus. U sljedećim poglavljima biti će opisana detaljnije termodinamika ORC-a.



Slika 5-1. Komponente organskog Rankineovog ciklusa (Parada, 2013)

5.1. Dostupna energija niskotemperaturnih ležišta

Učinkovitost energetske pretvorbe ovisi o vrsti izvora topline kao i o prevladavajućim uvjetima na površini, prvenstveno temperaturi. Na primjer, ogromne količine topline su sadržane u oceanima, ali ta toplina nije dovoljno visoka za iskorištavanje jer joj je temperatura vrlo blizu temperature okoline. U nekim slučajevima, voda niske temperature je dostupna na dubinama manjim od 1000 metara za odlaganje topline, ali termodinamička učinkovitost pretvorbe je vrlo niska. Ova neraspoloživost topline niske temperature posljedica je drugog zakona termodinamike koji postavlja kvantitativna ograničenja maksimalne količine korisnog rada koji se može proizvesti djelovanjem toplinskog motora između dva spremnika topline različitih temperatura.

Obzirom na svojstva fluida, specifičnu entalpiju, H , i entropiju, S , maksimalni koristan rad jednak je promjeni raspoloživosti geotermalnog fluida (ΔB) između uvjeta na ušću bušotine (p_{gf} , T_{gf}) i uvjeta okoline (p_0 , T_0):

$$W_{net}^{max} = (\Delta H - T_0 \Delta S) \Big|_{p_0, T_0}^{p_{gf}, T_{gf}} \quad (5-1)$$

gdje je:

W_{net}^{max} - maksimalan koristan rad niskotemperaturnih ležišta [J],

ΔH - razlika u specifičnoj entalpiji geotermalnog fluida na ušću bušotine i pri uvjetima okoline [J/kg],

T_0 - temperatura okoline [K],

ΔS - razlika u entropiji geotermalnog fluida na ušću bušotine i pri uvjetima okoline [J/kgK],

p_{gf} - tlak geotermalnog fluida [bar],

T_{gf} - temperatura geotermalnog fluida [K],

p_0 - tlak okoline [bar].

U mnogim slučajevima u praksi, djelovanje tlaka na raspoloživu pothlađenu kapljevину je zanemarivo pa se jednadžba za maksimalni rad zasićene kapljevine može pisati u uvjetima specifičnog toplinskog kapaciteta kapljevine, c_p (pretpostavlja se da je konstantan),

temperature geotermalnog fluida T_{gf} i temperature okoline T_0 , a u slučaju zasićene pare u uvjetima entalpije isparavanja, h_{fg} .

Zasićena kapljevina:

$$W_{net}^{max} = c_p \left\{ (T_{gf} - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_{gf}}{T_0} \right) \right\} \quad (5-2)$$

Zasićena para:

$$W_{net}^{max} = h_{fg} \left(1 - \frac{T_0}{T_{gf}} \right) + c_p \left\{ (T_{gf} - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_{gf}}{T_0} \right) \right\} \quad (5-3)$$

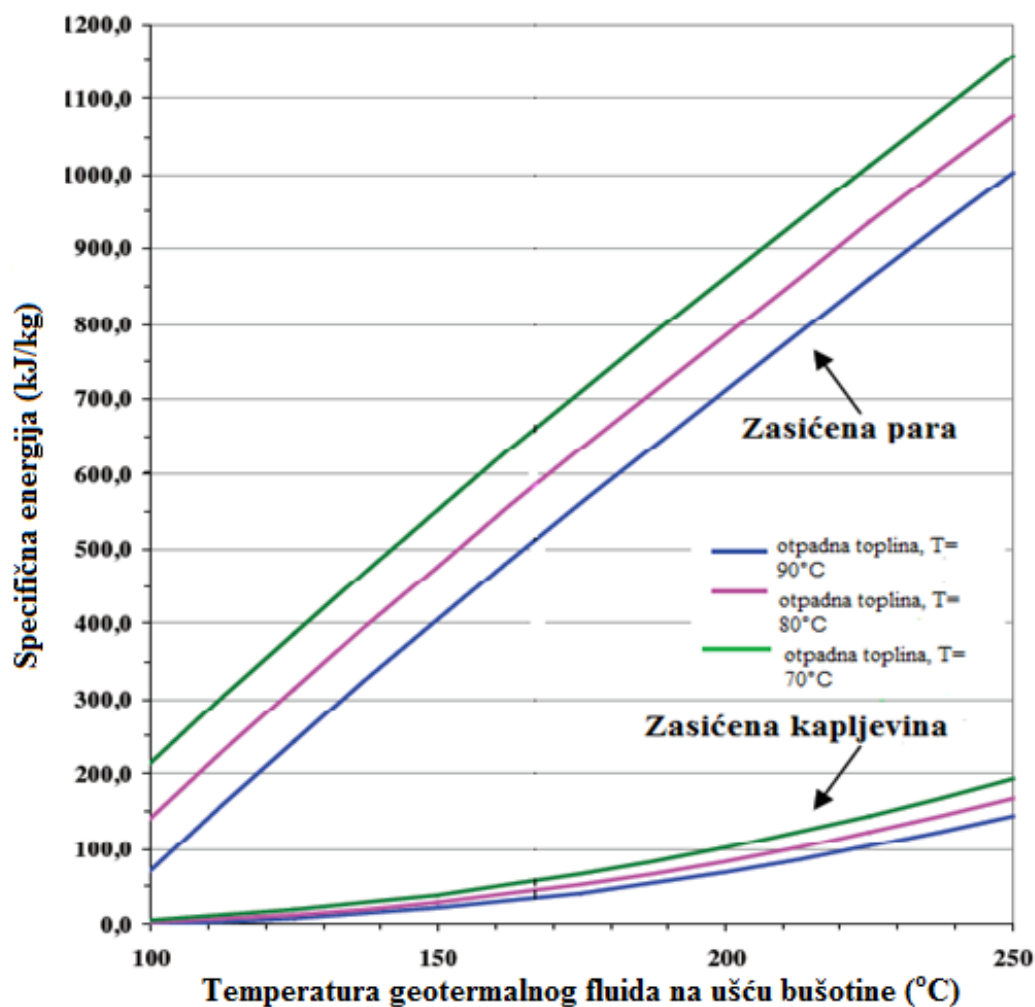
gdje je:

c_p - specifični toplinski kapacitet kapljevine [kJ/kgK],

h_{fg} - entalpija isparavanja [kJ/kg].

U slučaju specifičnih fizikalnih uvjeta jednačba (5-2) opisuje proces u kojem idealni toplinski stroj izdvaja količinu topline, $c_p(T_{gf}-T_0)$, iz zasićene kapljevine sve dok temperatura kapljevine ne dosegne temperaturu okoline. Dio ove topline reverzibilno se pretvara u rad, a ostatak $c_p T_0 \ln(T_{gf}/T_0)$ se utiskuje natrag u ležište kao otpadna toplota pri temperaturi T_0 .

Jednačba (5-3) se može izraziti preko dva uzastopna reverzibilna procesa; prvog koji prihvaća toplinu (h_{fg}) iz kondenzirajuće pare pri konstantnoj temperaturi geotermalnog fluida, T_{gf} , proizvodi koristan rad i ispušta dio topline $h_{fg}(T_0/T_{gf})$ u atmosferu. Drugi proces izvlači toplinu iz kondenzirajuće kapljevine istim postupkom kao i prvi proces iz jednačbe (5-2). Za niske temperature koje su ovdje razmotrene, prvi proces proizvodi znatno više energije od drugoga zbog visoke vrijednosti omjera $h_{fg}/[c_p(T_{gf}-T_0)]$. Ova činjenica prikazana je na Slici 5-2.



Slika 5-2. Ovisnost specifične energije o temperaturi geotermalnog fluida (Golub et al, 2004)

Slika 5-2. također prikazuje učinak utiskivanja geotermalnog fluida različitih temperatura na potencijal geotermalnog ležišta. Smanjenje temperature geotermalnog fluida prije njegova utiskivanja u ležište povećava iskoristivost ORC postrojenja više nego što bi ga povećalo povećanje temperature ležišta odnosno povećanje temperature geotermalnog fluida. Ako je moguće, jasno je vidljivo da je poželjno smanjenje otpadne temperature geotermalnog fluida kada i gdje to dopuštaju okolišni uvjeti.

5.2. Uvjeti učinkovitog rada Rankineovog ciklusa

U stvarnosti, savršeni toplinski motori ne postoje, a u najboljem slučaju samo dio teorijski raspoloživog rada se može dobiti iz kombinacije geotermalno ležište/okolina. Ako je cijena izrade bušotina visoka i/ili ako životni vijek ležišta nije siguran, tada postoji veći poticaj za

učinkovito iskorištavanje resursa osobito kad se radi o niskotemperaturnim ležištima. Učinkovito iskorištavanje geotermalnog ležišta će se dogoditi kada su zadovoljeni sljedeći uvjeti:

1. Većina topline je iskorištena iz geotermalnog fluida prije njegovog odstranjivanja ili utiskivanja.
2. Temperaturne razlike na površinama za prijenos topline održavaju se na najmanjim mogućim razinama.
3. Turbine i pumpe su pažljivo dizajnirane radi dobivanje optimalne učinkovitosti postrojenja.
4. Toplina je odbačena iz termodinamičkog ciklusa pri temperaturi blizu temperature okoline.

Bez obzira na to jesu li ispunjeni ovi uvjeti, učinkovito iskorištavanje ležišta uglavnom ovisi o odabiru radnog fluida i njegovim termodinamičkim svojstvima, temperaturi geotermalnog fluida i temperaturi rashladnog medija (voda ili zrak) uz pomoć kojeg se odbacuje preostala topline. Na primjer, ako se preostala topline treba odbaciti iz termodinamičkog ciklusa na neku nižu konstantnu temperaturu pomoću rashladnog sredstva (uvjet 4 u gornjem djelu teksta), kritična temperatura spoja mora biti veća od temperature rashladnog medija elektrane. Kao što će biti prikazano u poglavlju 5.3., ispunjavanje uvjeta 1 i 2 zahtijeva upotrebu nadkritičnog Rankineovog ciklusa. Prema tome, kritična temperatura radnog fluida bi trebala biti niža od temperature geotermalnog fluida.

U ovom radu odabrano je pet radnih fluida čija su termodinamička svojstva, prikazana u Tablici 5-1., zadovoljavala prethodno navedene kriterije. Iako su svi ovi radni fluidi adekvatni za upotrebu u raznim srednjotemperaturnim Rankineovim ciklusima, oni prilikom rada nemaju jednaku termodinamičku učinkovitost jer među njima postoje značajne razlike u dva svojstva, kritičnoj temperaturi T_c , i kritičnom tlaku p_c , koji najviše utječu na krajnju učinkovitost prijenosa topline. U poglavlju 5.3. će biti prikazano da termodinamički učinak znatno varira od spoja do spoja i da svaki spoj ima najvišu učinkovitost pri određenoj temperaturi geotermalnog fluida.

Tablica 5-1. Termodinamička svojstva radnih fluida

Ime spoja	Kemijska formula	Molarna masa M(g/mol)	Kritična temperatura, T _c (°C)	Kritični tlak, p _c (bar)	Temperatura isparavanja, T _b (°C)
R-717	NH ₃	17,0	133,6	112,8	-33,3
R-134a	CH ₂ FCF ₃	102,0	101,0	40,6	-26,3
R-22	CHClF ₂	86,5	96,1	49,8	-40,7
RC-318	C ₄ F ₈	200,0	115,3	27,8	-5,8
R-114	C ₂ Cl ₂ F ₄	170,9	145,7	32,6	3,5

Termodinamička svojstva radnih fluida imaju jednu od najvažnijih uloga u postupku dizajniranja Rankineovog ciklusa kako bi se energija geotermalnog ležišta optimalno koristila i kako bi se gubitci energije sveli na minimum. Ovo su neki od najvažnijih termodinamičkih svojstava koje radni fluidi trebaju zadovoljiti:

- Za određenu temperaturu izvora topline i temperaturu odbacivanja neiskorištene topline, snaga postrojenja, učinkovitost ciklusa i ukupan stupanj iskorištenja ležišta trebaju biti što veći.
- U podkritičnom Rankineovom ciklusu kritični tlak radnog fluida treba biti veći od tlaka u isparivaču.
- Što je gustoća pare radnog fluida veća, to je manji specifični volumen i volumni protok. Mali volumni protoci su poželjni zbog izbora manjih dijelova opreme. Para male gustoće ima visoki specifični volumen i zahtijeva veću opremu (izmjenjivač topline, turbina). Veća količina opreme znači skuplje komponente postrojenja, a ono što je još važnije je da visoki specifični volumen povećava pad tlaka u izmjenjivačima topline i zahtijeva veći rad pojne pumpe.
- Velika razlika u entalpiji radnog fluida na ulazu u turbinu i na njenom izlazu je poželjna.
- Veći konvektivni toplinski koeficijenti i koeficijenti toplinske vodljivost fluida povećavaju prijenos topline između geotermalnog i radnog fluida.
- Radni fluidi trebaju biti toplinski i kemijski stabilni.

Osim termodinamičkih uvjeta, radni fluidi trebaju zadovoljiti neke ekološke i sigurnosne uvjete. Što se tiče sigurnosti, velika pažnja je usredotočena na zapaljivost, samozapaljivost i toksičnost radnih fluida. Kriteriji zaštite okoliša uključuju potencijal iscrpljivanja ozona (ODP) i potencijal globalnog zatopljenja (GWP).

5.3. Optimizacija Rankineovog ciklusa

Kvantitativno se može odrediti stupanj učinkovitosti sustava, η_u , koji je mjera djela raspoložive energije geotermalnog fluida koja se može pretvoriti u koristan rad. Stupanj učinkovitosti sustava, η_u , može se definirati u uvjetima ukupne snage, P , protoka geotermalnog fluida, q_{gf} , i maksimalnog korisnog rada, W_{net}^{max} .

$$\eta_u = \frac{P}{W_{net}^{max} q_{gf}} = \frac{P}{q_{gf} \left[c_p (T_{gf} - T_0) - c_p T_0 \ln \left(\frac{T_{gf}}{T_0} \right) \right]} \quad (5-4)$$

gdje je :

η_u - ukupni stupanj učinkovitosti sustava,

P - ukupna snaga postrojenja [W],

q_{gf} - protok geotermalnog fluida [kg/s].

η_u je direktna mjera učinkovitosti iskorištavanja geotermalnog ležišta, jer za određeni T_{gf} , visoke vrijednosti η_u su posljedica malog protoka geotermalnog fluida za određenu izlaznu snagu. η_u se ne smije uspoređivati sa termodinamičkim stupnjem učinkovitosti ciklusa, η_{cycle} , koji pokazuje koliko je učinkovito prenesena geotermalna toplina pretvorena u koristan rad. Ako se u ovom prijenosu topline, geotermalni fluid ohladi na neku srednju temperaturu T_{gout} , tada se η_{cycle} može izraziti kao:

$$\eta_{cycle} = \frac{P}{q_{gf} c_p (T_{gin} - T_{gout})} \quad (5-5)$$

gdje je:

η_{cycle} - termodinamički stupanj učinkovitosti ciklusa,

T_{gin} - temperatura geotermalnog fluida na ulazu u izmjenjivač topline [K],

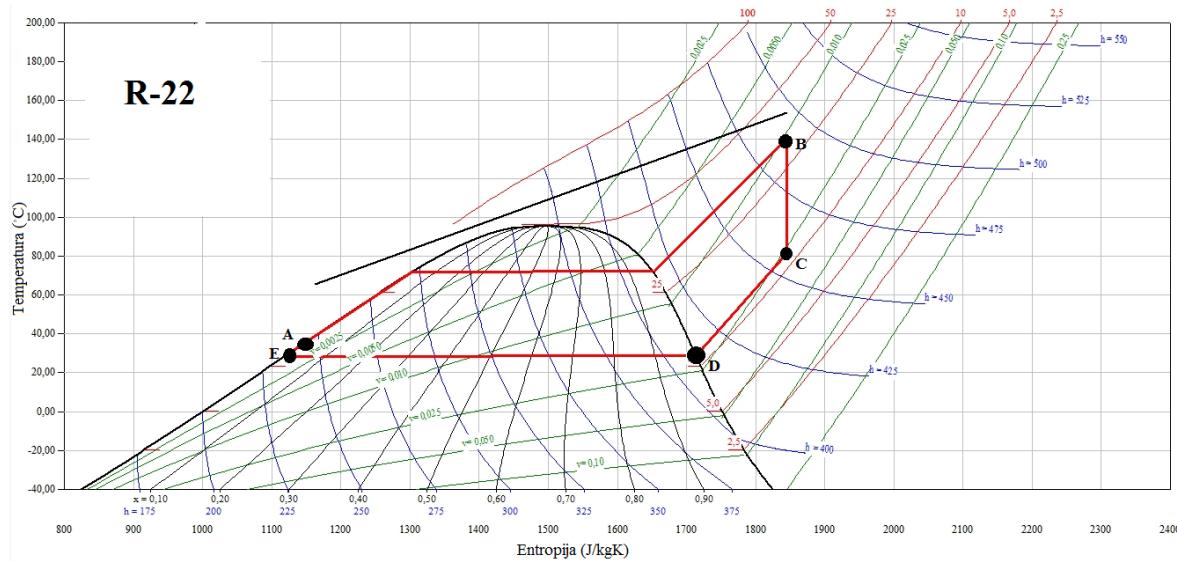
T_{gout} - temperatura geotermalnog fluida na izlazu iz izmjenjivača topline [K].

U slučaju kad se koristi samo malo topline iz geotermalnog fluida $T_{gin} \sim T_{gout}$, η_{cycle} će biti proporcionalno veći od η_u jer se toplota iz ležišta koristi jako malo. Razlog tome je to što se neiskorištena toplota geotermalnog fluida koji je ili odbačen ili ponovno utisnut u bušotinu ne smatra termodinamičkim gubitkom prilikom računanja η_{cycle} .

U načelu, η_u može imati bilo koju vrijednost između nula ($P=0$) i jedan ($P=q_{gf}W_{net}^{max}$); dok je u stvarnosti njegova vrijednost određena ekonomskim čimbenicima odnosno uravnoteženjem troškova pridobivanja topline (trošak bušenja i opremanja bušotine) obzirom na troškove korištenja te iste topline (izmjenjivači topline, turbine, pumpe) za proizvodnju električne energije u geotermalnoj elektrani. Ako η_u ima malu vrijednost, to znači da se ležište slabo iskorištava i da su potrebna velika ulaganja u izradu bušotina (trošak po jedinici snage $\rightarrow \infty$ kada $\eta_u \rightarrow 0$). S druge strane, ako se pristupi potpunom iskorištavanju potencijala ležišta uz uvjet da ne dođe do pothlađivanja ležišta, onda će ukupni troškovi izrade bušotina biti manji, ali potrebna ulaganja u visoko učinkovitu opremu za pretvorbu energije biti će velika (trošak po jedinici snage $\rightarrow \infty$ kada $\eta_u \rightarrow 1$). Ekonomski optimum je onda kada η_u ima neku srednju vrijednost, na primjer, u geotermalnoj elektrani Geysers, η_u ima vrijednost 0,55 pri temperaturi okoline $T_0=26,7^\circ\text{C}$ (Milora i Tester, 1976). U primjerima koji slijede, naglasak je na pokušaju dobivanja što veće vrijednosti η_u , ali unutar razumnih granica budući da se očekuje relativno visoki trošak pridobivanja geotermalne topline, pogotovo u ležištima niskih temperatura u kojima je kapljevina dominantna faza.

U sljedećim analizama učinak Rankineovog ciklusa je izračunat korištenjem jednadžbi koje opisuju rad i toplinski tok fluida kroz najvažnije dijelove geotermalne elektrane s binarnim ciklusom uz pomoć računalnog programa CoolPack. Temperatura geotermalnog fluida na izlazu iz izmjenjivača topline je pretpostavljena, uvjeti rada kondenzatora su kontrolirani na način da se odredila izlazna temperatura radnog fluida iz kondenzatora koja odgovara temperaturi okoline T_0 . Nakon izbora radnog fluida i ulazne temperature geotermalnog fluida, T_{gin} , te određivanja gore napisanih uvjeta, najvažnija neovisna varijabla je maksimalni radni tlak ciklusa na ulazu u turbinu. Slika 5-3. prikazuje T-S dijagram ključnih termodinamičkih koraka koji su uključeni u Rankineov ciklus prijenosa topline. Spoj koji je odabran za prikaz ciklusa je R-22 (CHClF_2) koji ima kritičnu

temperaturu 86,5°C i zbog toga je prikladan za rad i u podkritičnom i nadkritičnom Rankineovom ciklusu pri temperaturi geotermalnog fluida od 150°C.



Slika 5-3. Rankineov ciklus radnog fluida R-22 pri radnom tlaku ciklusa od 31 bar, prikazan u T-S dijagramu

Proces počinje tako što se zasićena kapljevina tlači iz točke E (gdje je na tlaku pare koji odgovara minimalnoj temperaturi ciklusa T_0) na tlak izmjenjivača topline u točki A (zbog nemogućnosti očitavanja vrijednosti entalpije lijevo od linije zasićene kapljevine u programu CoolPack, rad pumpe na grafu nije prikazan izentropski). Rad (po jedinici mase) potrošen u ovom koraku odgovara razlici u specifičnim entalpijama između točke A i E:

$$W_p = H_A - H_E \quad (5-6)$$

gdje je:

W_p – rad pojne pumpe [kJ],

H_A – vrijednost specifične entalpije radnog fluida u točki A [kJ/kg],

H_E – vrijednost specifične entalpije radnog fluida u točki E [kJ/kg].

Fluid koji je sada zagrijan na temperaturu malo višu od temperature T_0 , se zagrijava toplinom geotermalnog fluida sve dok mu temperatura ne dosegne temperaturu isparavanja od 70°C koja odgovara maksimalnom radnom tlaku ciklusa, u ovom slučaju ($p_{\text{cycle}}=31\text{bar}$). Daljnje dodavanje topline radnom fluidu uzrokuje da fluid počne prelaziti iz kapljevito u plinovito stanje pri konstantnoj temperaturi sve dok se u potpunosti ne pretvori u paru.

Nakon što je radni fluid u potpunosti prešao u paru, dodaje mu se dodatna toplina (pregrijavanje) sve dok se ne dosegne maksimalna temperatura ciklusa u točki B. U ovom radu ova temperatura je odabrana da bude manja za 10°C od maksimalne temperature geotermalnog fluida.

Kosa crna crta iznad ciklusa zagrijavanja radnog fluida prikazuje kako se mijenja entalpija geotermalnog fluida sa smanjenjem njegove temperature protjecanjem kroz izmjenjivač topline. Minimalna razlika u temperaturi između radnog i geotermalnog fluida ili "pinch" točka je u izmjenjivaču topline na mjestu gdje radni fluid počinje isparavati. U ovom primjeru izlazna temperatura geotermalne kapljevine je 65°C i preostala toplina u geotermalnom fluidu nakon izmjenjivača topline je poprilično mala (vidi Sliku 5-2.). Energetsko uravnoteženje za cijeli postupak dodavanja topline povezuje protok geotermalnog i radnog fluida sa promjenom temperature geotermalnog fluida i promjenom specifičnih entalpija radnog fluida između točki A i B:

$$q_{gf}c_{pgf} (T_{gin} - T_{gout}) = q_{wf}(H_B - H_A) \quad (5-7)$$

gdje je:

c_{pgf} - specifični toplinski kapacitet geotermalnog fluida [kJ/kgK],

q_{wf} - protok radnog fluida [kg/s],

H_B – vrijednost specifične entalpije radnog fluida u točki B [kJ/kg].

Sljedeći korak u ciklusu predstavlja ekspanziju kroz turbinu, koja počinje u točki B i završava na nižem tlaku koji odgovara tlaku pare radnog fluida na temperaturi pri kojoj se odbacuje preostala toplina u kondenzatoru. Specifična entalpija radnog fluida na izlazu iz turbine (točka C) je određena s učinkovitosti turbine, η_t , i promjeni entalpije do koje bi došlo kad bi para ekspandirala adijabatski (nema gubitaka topline), s neznatnim gubitkom topline zbog trenja, do ispušnog tlaka koji odgovara tlaku ciklusa pri temperaturi T_0 . Ovo je idealni slučaj i ekspanzija kroz turbinu bi trebala biti izenotropska. Rad kojeg je proizvela turbina prilikom ekspanzije radnog fluida prikazan je sljedećom jednačbom u uvjetima izenotropskog pada vrijednosti specifične entalpije:

$$W_t = H_B - H_C = \eta_t \{H_B[S_B, p_B] - H_C[S_B, p_{T0}]\} \quad (5-8)$$

gdje je:

W_t - rad turbine [J],

H_C – vrijednost specifične entalpije radnog fluida u točki C [J/kg],

η_t - učinkovitost rada turbine,

S_B - vrijednost entropije radnog fluida u točki B [J/kgK],

p_B – tlak radnog fluida u točki B [bar],

p_{To} – tlak radnog fluida pri temperaturi kondenzacije.

Uobičajena učinkovitost turbine, η_t , je 0,85 osim ako prilikom ekspanzije radni fluid ne uđe u dvofazno područje. Kada se pojavi kapljevita faza u turbini, učinkovitost se znatno smanjuje prvenstveno zbog udaranja kapljevite faze na lopatice turbine. Zbog toga se učinkovitost rada turbine s udjelom kapljevite faze računa kao razlika između učinkovitosti rada turbine sa suhom fazom i udjela kapljevite faze x ,

$$\eta_t = \eta_{t,dry} - x \quad (5-9)$$

gdje je:

$\eta_{t,dry}$ - učinkovitost rada turbine sa suhom fazom,

x - udio kapljevite faze u turbini.

Na izlazu iz turbine, postoji mogućnost da je radni fluid i dalje pregrijan iznad minimalne temperature pri kojoj se toplina odbacuje. Ta toplina koja se mora ukloniti iz pare prije nego što dođe do postupka kondenzacije, predstavlja termodinamički gubitak budući da se dodatni rad može ostvariti iz pare koja se hladi pri konstantnom tlaku do točke zasićenja, točka D. Na Slici 5-3. značajna količina neiskorištene topline je prikazana u velikoj razlici u specifičnim entalpijama radnog fluida između točke C i točke D. Velika količina neiskorištene topline također povećava potrebnu površinu opreme za odbacivanje topline, budući da su koeficijenti prijelaza topline u plinovitoj fazi znatno niži od koeficijenata prijelaza topline prilikom kondenzacije.

Nakon što se odbacila toplina pregrijane pare, preostala neiskorištena toplina je uklonjena u kondenzatoru pri konstantnoj temperaturi okoline, T_0 , i tlaku zasićenja, p_{T0} , dok fluid mijenja fazu iz stanja zasićene pare u zasićenu kapljevину. U ovom radu temperatura kondenzacije je pretpostavljena i iznosi 30°C .

Ukupna osjetna i latentna toplina koja je uklonjena iz ciklusa prikazana je kao razlika u specifičnim entalpijama između točke C i E:

$$Q_{rej} = H_C - H_E \quad (5-10)$$

gdje je:

Q_{rej} - ukupna količina topline uklonjena iz ciklusa [J].

Neto snaga razvijena u ciklusu je razlika između snage proizvedene radom turbine i snage pumpe potrebne za podizanje tlaka kondenzatu na tlak izmjenjivača topline. Zanimareni su sekundarni gubici koji uključuju pad tlaka u ciklusu, gubitke topline u izmjenjivačima topline i dodatnu snagu pumpe koja je nekad potrebna. Neto proizvedena snaga može se izraziti pomoću potoka radnog fluida:

$$P_{neto} = q_{wf}\{(H_B - H_C) - (H_A - H_E)\} \quad (5-11)$$

Snaga se još može izračunati i kao razlika u omjerima dodavanja topline radnom fluidu u predgrijaču i isparivaču i omjera oduzimanja topline u kondenzatoru i regeneratu:

$$P_{neto} = q_{wf}\{(H_B - H_A) - (H_C - H_E)\} \quad (5-12)$$

gdje je:

P_{neto} - neto snaga [kW].

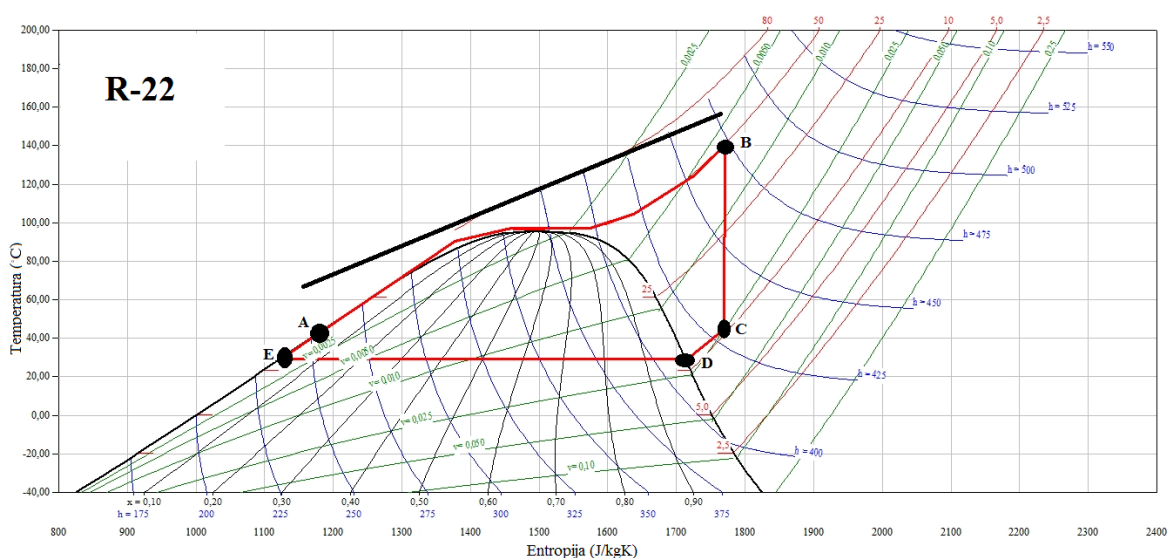
Termodinamički stupanj učinkovitosti ciklusa, η_{cycle} , i ukupan stupanj učinkovitosti sustava, η_u , sada mogu biti izraženi samo preko vrijednosti specifičnih entalpija radnog fluida u karakterističnim točkama u radu ciklusa i temperature geotermalnog fluida prije i poslije prijenosa topline, uz pretpostavku da je specifični toplinski kapacitet geotermalnog fluida konstantan:

$$\eta_{cycle} = 1 - \frac{(H_C - H_E)}{(H_B - H_A)} \quad (5-13)$$

$$\eta_u = \frac{(T_{gin} - T_{gout})\eta_{cycle}}{(T_{gin} - T_0) - T_0 \ln\left(\frac{T_{gin}}{T_0}\right)} \quad (5-14)$$

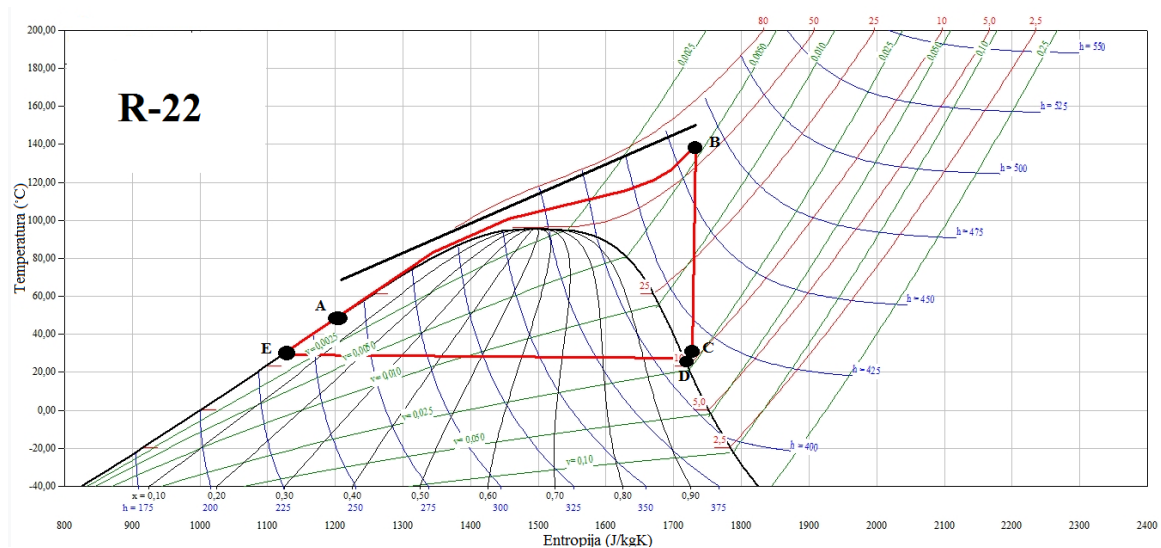
Iako je geotermalni fluid ohlađen na 65°C u ovom primjeru (Slika 5-3.), toplina ležišta je slabo iskorištena jer je velika količina osjetne topline visoke temperature odbačena u regeneratore. Niski termodinamički stupanj učinkovitosti ciklusa (11,6%) je odgovoran i za relativno malu ukupnu učinkovitost sustava (52,5%). Iz jednadžbe (5-14) se vidi da je za visoki stupanj učinkovitosti sustava potreban visoki termodinamički stupanj učinkovitosti ciklusa i velika količina topline iz geotermalnog fluida.

Da bi se povećala učinkovitost sustava, radni tlak ciklusa je povećan na 50 bara (Slika 5-4.). Kod nadkritičnog tlaka ne dolazi do promjene faze radnog fluida pri konstantnoj temperaturi što se i vidi na Slici 5-4. i temperaturne razlike u izmjenjivaču topline su smanjene. Ovaj učinkovitiji proces prijenosa topline povećava termodinamičku učinkovitost ciklusa pomicanjem vrijednosti specifičnih entalpija na ulazu i izlazu turbine (točke B i C) bliže liniji zasićene pare. Posljedica toga je da je manje topline odbačeno u regeneratore, a ukupna učinkovitost sustava povećana je na 13,1%. Budući da je izlazna temperatura geotermalnog fluida ostala ista kao u prethodnom primjeru, ukupni stupanj učinkovitosti se povećao na 58,7%.



Slika 5-4. Rankineov ciklus radnog fluida R-22 pri radnom tlaku ciklusa od 50 bara prikazan u T-S dijagramu

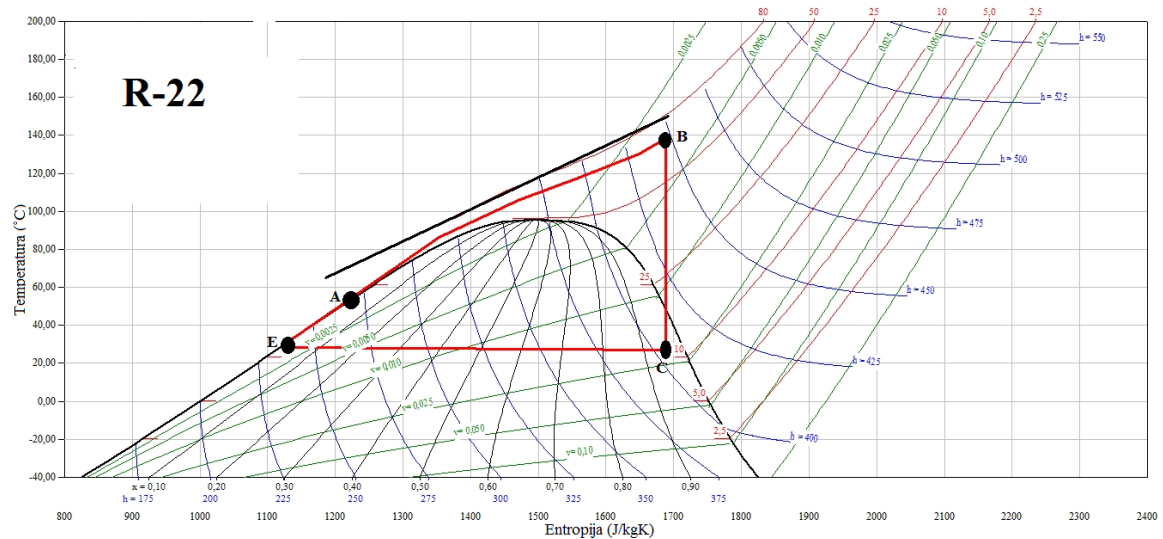
Na Slici 5-5. radni tlak ciklusa je povećan na 59 bara. Proces prijenosa topline pri ovom tlaku je skoro idealan zbog toga što se temperaturna razlika između geotermalnog fluida i radnog fluida održava gotovo konstantnom tijekom cijelog ciklusa prijenosa topline. Ova ujednačena temperatura razlika se može pripisati konstantnosti specifičnog toplinskog kapaciteta radnog fluida pri visokim tlakovima. Linija koja označava put ekspanzije radnog fluida kroz turbinu proteže se vrlo blizu linije zasićene pare i samo mali dio topline pregrijane pare mora biti uklonjen da bi se radnom fluidu temperatura smanjila do temperature zasićenja. Kombinirani učinak visoke termodinamičke učinkovitosti ciklusa (14%) i visokog stupnja iskorištenja topline iz geotermalnog fluida rezultira visokim ukupnim stupnjem učinkovitosti sustava (63,0%).



Slika 5-5. Rankineov ciklus radnog fluida R-22 pri radnom tlaku ciklusa od 59 bara prikazan u T-S dijagramu

Da bi se u potpunosti uklonila potreba za uklanjanjem topline iz pregrijane pare nakon izlaska iz turbine potrebno je još više povećati tlak sustava kao što je prikazano na Slici 5-6. na kojoj je radni tlak ciklusa 79 bara. Učinkovitost prijenosa topline je gotovo ista kao u prethodnom primjeru, ali linija koja predstavlja put ekspanzije radnog fluida kroz turbinu se pomaknula lijevo unutar dvofaznog područja radnog fluida sa sadržajem vlage od 2%. To negativno utječe na termodinamičku učinkovitost ciklusa koja je pala na 9,3%. Za ovako visoki radni tlak ciklusa, povećala se potrebna snaga za rad pumpe koja se vidi iz veće razlike u entalpijama radnog fluida između točke A i E. Budući da se termodinamička učinkovitost ciklusa smanjila, mora se smanjiti i ukupni stupanj učinkovitosti sustava (41,6%). Svako daljnje povećanje radnog tlaka sustava rezultirat će još nižom

termodinamičkom učinkovitosti koju prati sve lošija učinkovitost rada turbine i sve veća potrebna snaga za rad pumpe. U Tablici 5-2. nalaze se rezultati analize rada radnog fluida R-22 pri različitim tlakovima sustava.



Slika 5-6. Rankineov ciklus radnog fluida R-22 pri radnom tlaku ciklusa od 79 bara prikazan u T-S dijagramu

Tablica 5-2. Rezultati analize rada radnog fluida R-22

Radni tlak (bar)	η_{cycle}	η_u
31	11,6	52,5
50	13,1	58,7
59	14,0	63,0
79	9,3	41,6

5.4. Analiza ireverzibilnosti Rankineovog ciklusa

Učinak radnog tlaka sustava na ukupnu učinkovitost sustava najbolje se vidi ako se promotri učinak rada svake od komponenti sustava. Koncept termodinamičke ireverzibilnosti je koristan za identifikaciju mjesta glavnih neučinkovitosti sustava. Za svaki proces u kojem materijal prolazi kroz promjenu termodinamičkog stanja, vrijednost funkcije ireverzibilnosti, I , je mjera potencijalnog rada koji je izgubljen kroz sustav zbog ireverzibilnosti procesa kao što su trenje u turbini i pumpi, i temperaturne razlike nastale na površini izmjenjivača topline. Četiri glavna koraka termodinamičkog ciklusa su potencijalni izvori ireverzibilnosti:

1. Stlačivanje kondenzata na potreban tlak sustava
2. Prijenos topline između geotermalnog i radnog fluida
3. Ekspanzija radnog fluida kroz turbinu
4. Odbacivanje osjetne topline u okolinu u regeneratoru.

Osim toga, neiskorištena toplina geotermalnog fluida odbačena iz izmjenjivača topline je važan gubitak i također se mora uzeti u obzir. Sljedeće jednadžbe odnose se na komponente ireverzibilnosti iz Rankineovog ciklusa:

Ireverzibilnost pojne pumpe:

$$I = (1 - \eta_p)(H_A - H_E) \quad (5-15)$$

Ireverzibilnost izmjenjivača topline:

$$I = \frac{T_0(H_B - H_A)}{(T_{gin} - T_{gout})} \int_{T_{gout}}^{T_{gin}} \frac{T_{gin} - T_{wf}}{T_{gin} T_{wf}} dT_{gin} \quad (5-16)$$

Ireverzibilnost turbine:

$$I = T_0 \int_{H_C}^{H_B} \frac{dH}{T} \approx \frac{T_0}{T_{ex}} \left[\frac{1 - \eta_t}{\eta_t} \right] (H_B - H_C) \quad (5-17)$$

Ireverzibilnost odbacivanja osjetne topline (regenerator):

$$I = (H_C - H_D) - T_0 \int_{H_D}^{H_C} \frac{dH}{T} \quad (5-18)$$

Ireverzibilnost utiskivanja geotermalnog fluida:

$$I = \frac{(H_B - H_A)}{(T_{gin} - T_{gout})} \left\{ T_{gout} - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T_{gout}}{T_0} \right) \right\} \quad (5-19)$$

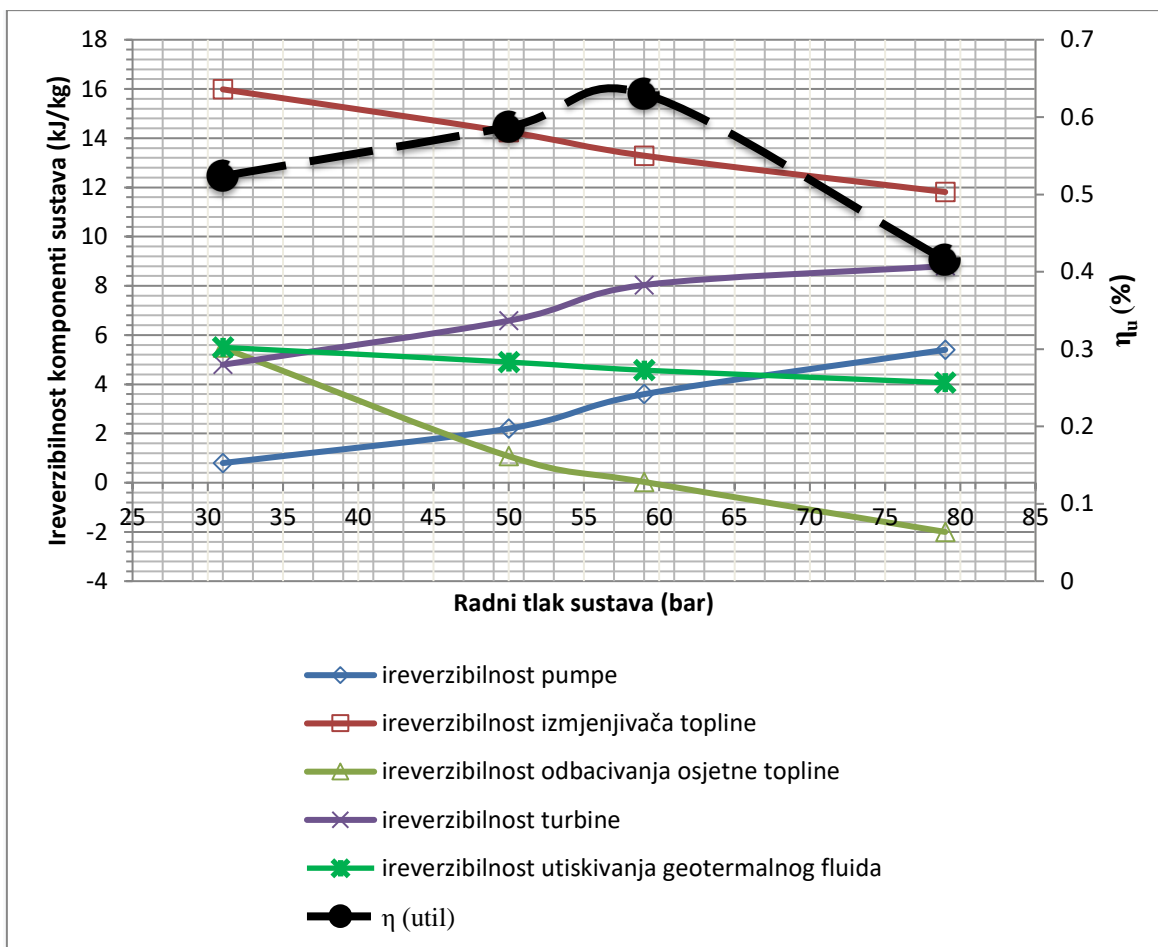
gdje je:

I - ireverzibilnost komponenti sustava [kJ/kg]

T_{wf} - temperatura radnog fluida [K],

T_{ex} - temperatura radnog fluida na izlazu iz turbine [K].

Jednadžbe za izračunavanje ireverzibilnosti ukazuju na potrebu održavanja visoke učinkovitosti pojne pumpe i turbine pri čemu se minimiziraju vrijednosti kao što su temperaturne razlike izmjenjivača topline, količina pregrijane pare na izlazu iz turbine i temperatura geotermalnog fluida na izlasku iz izmjenjivača topline. U najboljem slučaju, ovi uvjeti se mogu ispuniti samo djelomično pri određenom radnom tlaku sustava, a posljedično i optimalna učinkovitost sustava će se dogoditi pri određenom radnom tlaku kada je ukupni zbroj svih ireverzibilnosti minimalan.



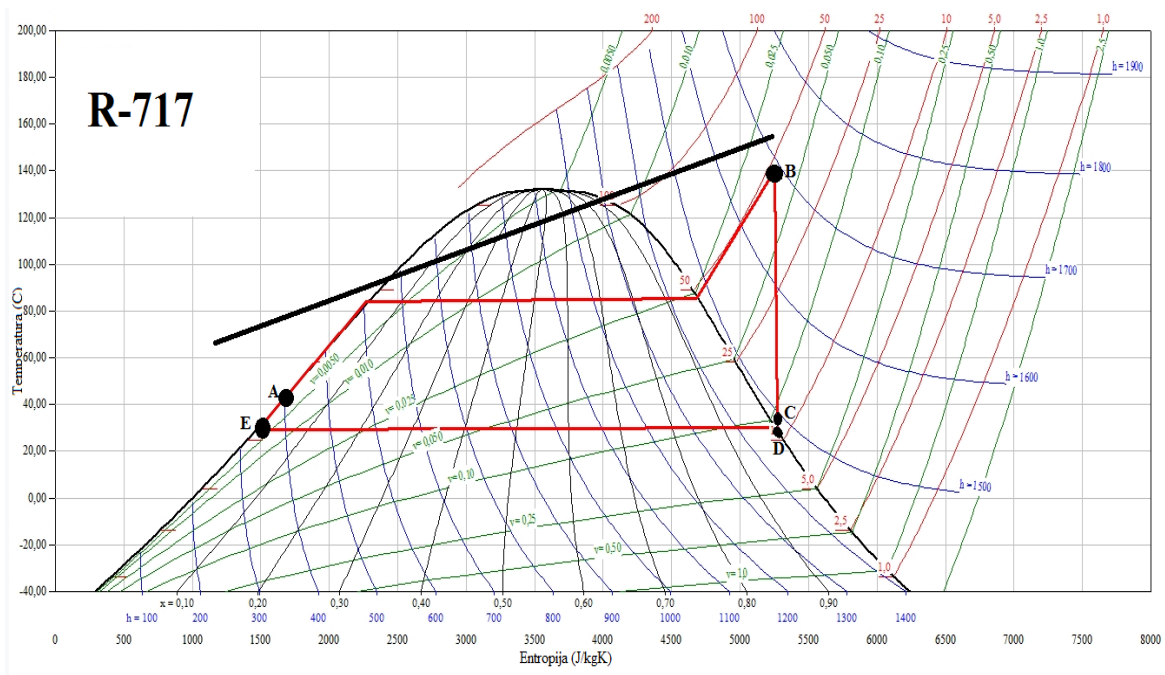
Slika 5-7. Ireverzibilnost pojedinih komponenti sustava u funkciji radnog tlaka sustava za radni fluid R-22, pri temperaturi geotermalnog fluida od 150°C i temperaturi okoline od 30°C

Ova činjenica je prikazana na Slici 5-7. na kojoj su pripadajuće funkcije ireverzibilnosti komponenti sustava nacrtane u ovisnosti radnog tlaka sustava za radni fluid R-22 pri temperaturi geotermalnog fluida od 150°C, izlaznoj temperaturi geotermalnog fluida od 65°C, temperaturi okoline od 30°C i pri četiri različita radna tlaka sustava. Kod podkritičnih uvjeta (radni tlak sustava je manji ili neznatno veći od kritičnog tlaka radnog fluida koji iznosi 49,8 bar), toplinske neučinkovitosti koje su posljedica visokih temperaturnih razlika u izmjenjivaču topline, visokih temperatura pare na izlazu iz turbine i neiskorištene osjetne topline su velike u usporedbi s mehaničkim neučinkovitostima turbine i pojne pumpe. Ireverzibilnost izmjenjivača topline dominira i ponajviše zbog nje je ukupna učinkovitost ciklusa niska. Kako se povećava radni tlak sustava tako se i povećavaju izlazni omjeri pojne pumpe i turbine pa se stoga i njihova ireverzibilnost povećava. Pri srednjim tlakovima, ovaj nedostatak je uravnotežen s poboljšanim radom

izmjenjivača topline i boljim učinkom regeneratora. Posljedica toga je veća učinkovitost sustava. Ovakvo kretanje se nastavlja do tlaka sustava od 59 bara. Pri tom tlaku izmjenjivač topline radi gotovo idealno kao što je prikazano na Slici 5-5., na kojoj je temperaturna razlika između geotermalnog fluida i radnog fluida minimalna kroz cijeli postupak prijenosa topline. Isto vrijedi i za ireverzibilnost odbacivanja osjetne topline koja je minimalna. Svako daljnje povećanje tlaka sustava rezultirat će smanjenjem učinkovitosti sustava budući da se mehaničke ireverzibilnosti pojne pumpe i turbine povećavaju proporcionalno s tlakom. Ovo smanjenje učinkovitosti se vidi u smanjenim vrijednostima ukupne učinkovitosti sustava, a glavni uzrok tome je što put ekspanzije radnog fluida kroz turbinu ulazi u dvofazno područje.

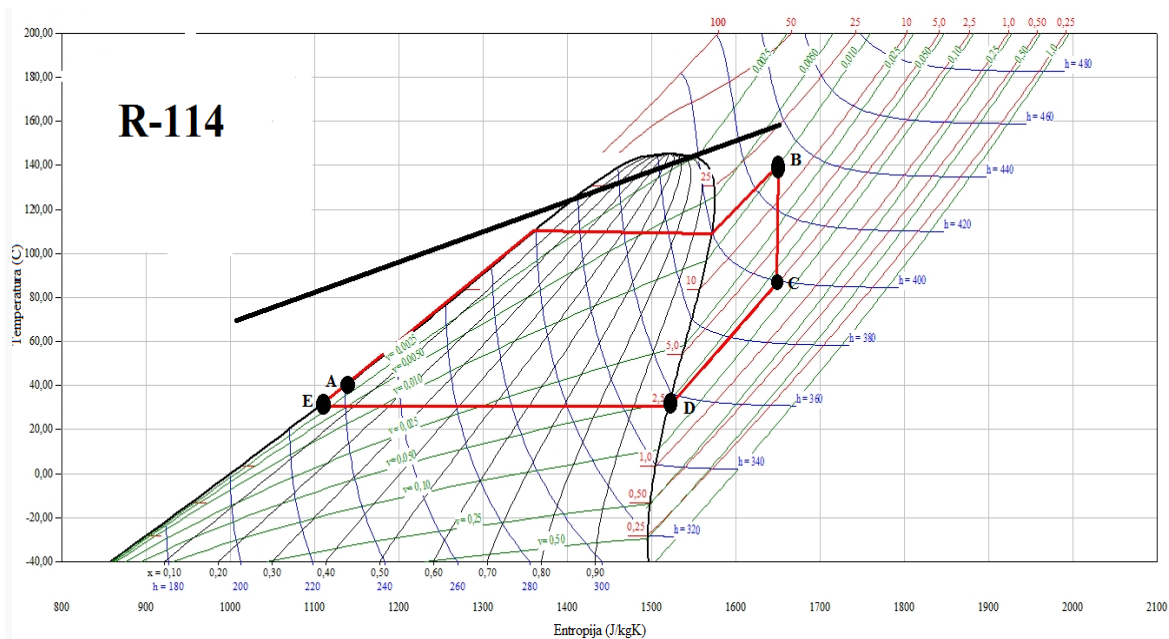
5.5. Analiza rada radnih fluida u Rankineovom ciklusu

U primjeru iz prethodnog poglavlja, optimalna učinkovitost sustava se događa pri tlaku sustava od 59 bara iako se relativno dobra učinkovitost η_u , od 60% može ostvariti pri tlaku sustava od 51 bara pri kojem je potrebna manja snaga za rad pojne pumpe. Općenito, ostali radni fluidi obrađeni u ovom radu pokazuju slično ponašanje kao R-22, ali specifične vrijednosti optimalnih učinkovitosti sustava i radnih tlakova ciklusa ovise o termodinamičkim karakteristikama radnih fluida i o temperaturi ležišta. Na Slici 5-8. prikazan je Rankineov ciklus radnog fluida R-717 (amonijak) pri istim ulaznim parametrima kao u primjeru s R-22 i tlakom sustava od 45 bara.



Slika 5-8. Rankineov ciklus amonijaka pri tlaku sustava od 45 bara

Kod amonijaka temperatura na ulazu u turbinu je neznatno veća od njegove kritične temperature i optimalna učinkovitost sustava se događa u podkritičnim uvjetima pri tlaku ciklusa od 45 bara. Rad u nadkritičnim uvjetima je moguć, ali nije učinkovit budući da bi linija koja prikazuje ekspanziju amonijaka ušla u dvofazno područje u kojem je učinkovitost turbine jako mala. Iz tog razloga ukupni stupanj učinkovitosti je nizak i iznosi 41%. Da bi se bolje prikazao utjecaj termodinamičkih svojstava pojedinih radnih fluida i oblika linije zasićene pare na ukupnu učinkovitost sustava, napravljena je još jedna analiza Rankineovog ciklusa za radni fluid R-114 (Slika 5-9.).



Slika 5-9. Rankineov ciklus fluida R-114

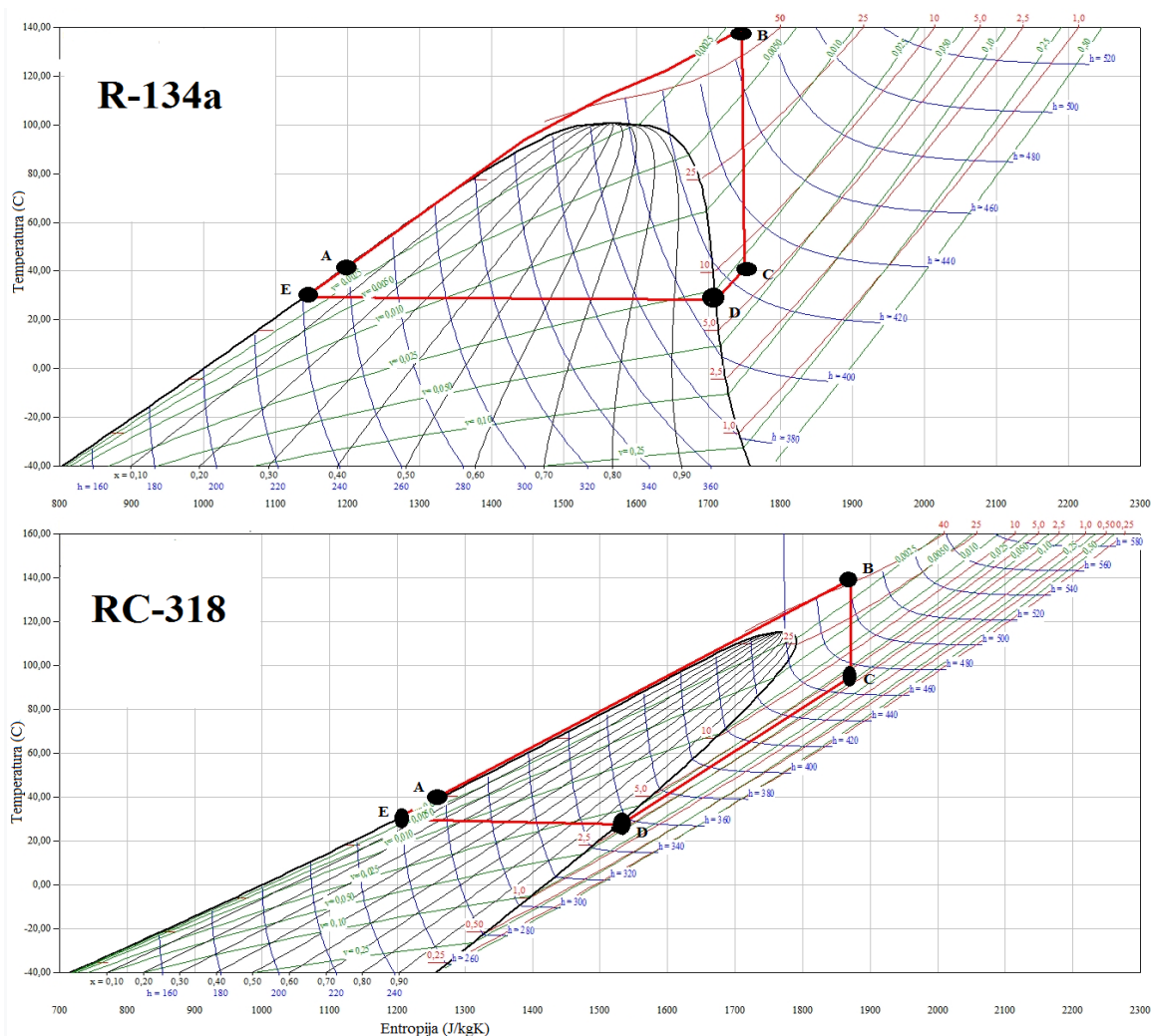
Za razliku od amonijaka čija linija zasićene pare ima nagib prema lijevo što osigurava adijabatsku ekspanziju sve do linije zasićene pare i temperature neznatno više od temperature kondenzacije (mokri fluid), linija zasićene pare radnog fluida R-114 nagnuta je prema desno (suhi fluid) i adijabatska ekspanzija do temperature kondenzacije nije moguća što se i vidi na Slici 5-9. Linija koja označava put ekspanzije radnog fluida (linija između točke B i C) udaljena je za određenu udaljenost od linije zasićene pare zbog čega dolazi do odbacivanja osjetne topline (linija između točke C i D) i što je ta udaljenost veća, ukupna učinkovitost sustava je manja. Konkretno u ovom slučaju, za iste ulazne parametre i tlak sustava od 17 bara (podkritični uvjeti), termodinamička učinkovitost ciklusa iznosi 8,2% dok je ukupni stupanj učinkovitosti 36%. Iako nije velika razlika u kritičnoj temperaturi ($\Delta T = 12^\circ\text{C}$) između amonijaka i R-114, za iste ulazne parametre, amonijak pokazuje viši ukupni stupanj učinkovitosti ponajviše zbog oblika linije zasićene pare koja je nagnuta prema lijevo.

Karakteristični oblik linije zasićene pare razlikuje se od fluida do fluida, a najviše ovisi o funkciji specifičnog toplinskog kapaciteta idealnog plina, odnosno funkciji reducirane specifične topline stanja idealnog plina (c_p^*/R). Općenito spojevi koji imaju složenu molekularnu strukturu kao što je RC-318 i halogenizirani derivati etana kao što je R-114 će nakon ekspanzije u podkritičnim uvjetima biti u pregrijanom području i biti će potrebno odbaciti veliku količinu osjetne topline prije nego fluid uđe u kondenzator. S druge strane spojevi s relativno jednostavnom molekularnom strukturom kao što su amonijak i

halogenizirani derivati metana (R-22) će nastojati izgubiti cijelu toplinu prilikom ekspanzije.

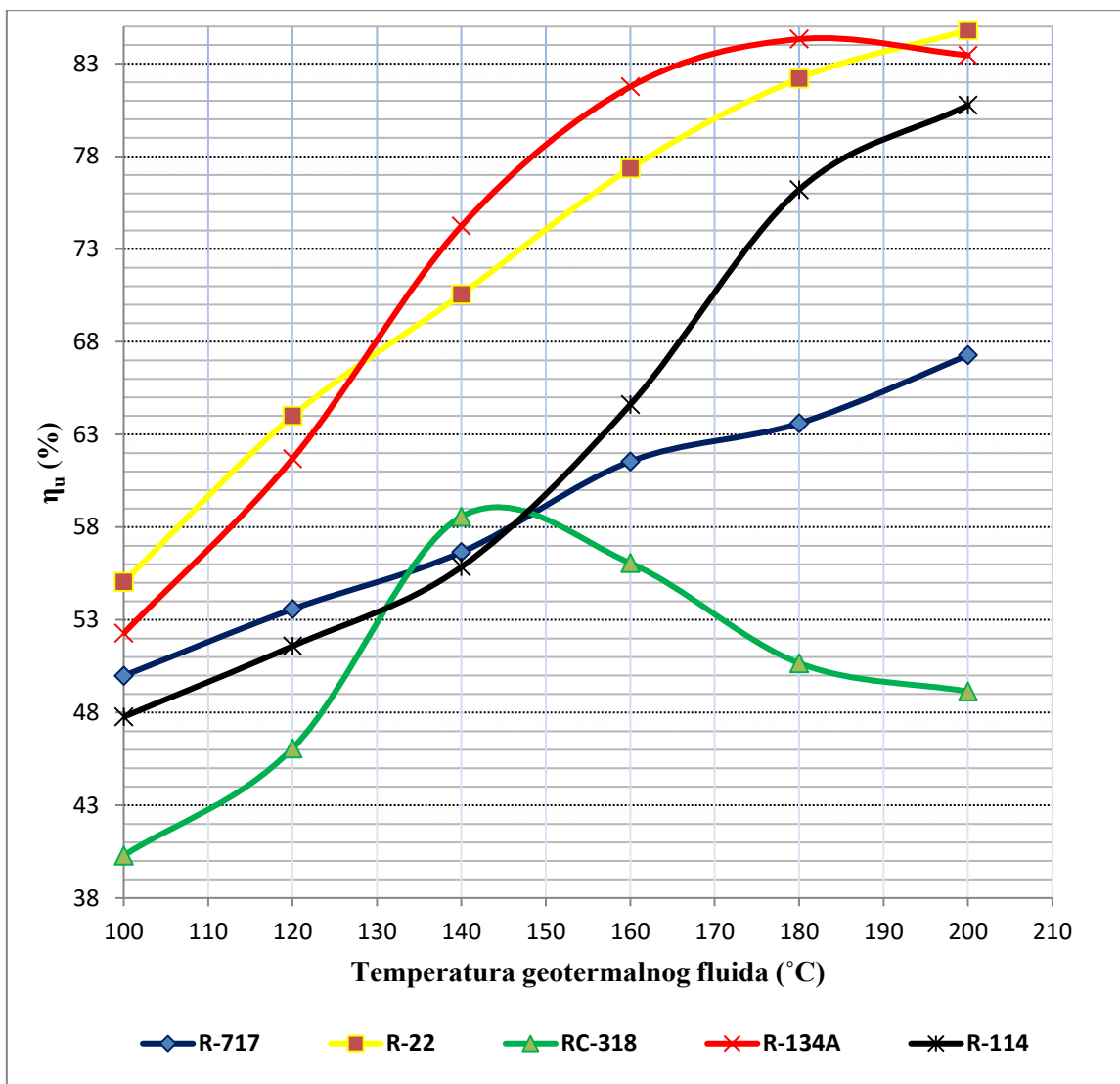
Pod istim uvjetima rada, spojevi s jednostavnom molekularnom strukturom će imati veće vrijednosti učinkovitosti sustava u podkritičnim uvjetima rada.

Kritična temperatura radnih fluida također je jako bitan pokazatelj uvjeta u kojima će se ciklus odvijati. Oni fluidi koji imaju kritičnu temperaturu blizu vrijednosti temperature geotermalnog fluida neće moći raditi u nadkritičnim uvjetima jer bi se u suprotnom ekspanzija odvijala u dvofaznom području što će na kraju rezultirati malom učinkovitosti i oštećenjem turbine. S druge strane fluidi koji imaju kritičnu temperaturu nižu od temperature geotermalnog fluida ostvarivat će veću učinkovitost pri radu u nadkritičnim uvjetima nego što bi to bio slučaj u podkritičnim uvjetima. Zbog toga, pri temperaturi geotermalnog fluida od 150°C, radni fluidi R-717 i R-114 mogu raditi samo u podkritičnim uvjetima i optimalna učinkovitost će se dogoditi u tim uvjetima. Radni fluidi R-22, R-134a i RC-318 imaju niže kritične temperature od temperature geotermalnog fluida i oni mogu raditi u nadkritičnim uvjetima u kojima pokazuju optimalnu učinkovitost. Na Slici 5-10. prikazan je Rankineov ciklus radnih fluida R-134 i RC-318 u nadkritičnim uvjetima rada.



Slika 5-10. Rankineov ciklus fluida R-134a i RC-318 u nadkritičnim uvjetima pri temperaturi geotermalnog fluida od 150°C

Na temelju svih čimbenika koji utječu na ukupni stupanj učinkovitosti sustava napravljen je proračun za pet radnih fluida čija se termodinamička svojstva nalaze u Tablici 5-1. U proračun nije uzet u obzir rad pojne pumpe stoga su dobivene vrijednosti učinkovitosti η_u veće nego što je to u realnom slučaju, a rad pojne pumpe ovisi o karakteristikama pumpe i radnom tlaku sustava. Za svaki radni fluid, pri određenoj temperaturi geotermalnog fluida izračunata je optimalna učinkovitost koju taj fluid pri određenom tlaku sustava može ostvariti. Na Slici 5-11. prikazan je ukupni stupanj učinkovitosti sustava, η_u , u funkciji temperature geotermalnog fluida pri optimalnim uvjetima rada.



Slika 5-11. Ukupni stupanj učinkovitosti, η_u , kao funkcija temperature geotermalnog fluida

Pri temperaturi od približno 100°C svi radni fluidi rade u podkritičnim uvjetima jer je temperatura geotermalnog fluida manja ili samo malo iznad kritičnih temperatura radnih fluida. Kako temperatura geotermalnog fluida raste, tako oni fluidi koji imaju najniže kritične temperature prvi ostvaruju veće vrijednosti η_u zbog mogućnosti rada u nadkritičnim uvjetima.

Također fluidi koji imaju visoki omjer c_p^*/R (RC-318, R-114, R-134a) pokazuju oštiji porast η_u -a pri malom temperaturnom rasponu što znači brzi prijelaz na rad u nadkritične uvjete. S druge strane, R-717, pokazuje veću učinkovitost u većim temperaturnim rasponima tako da će R-717 imati najviše vrijednosti η_u -a pri većim temperaturama geotermalnog fluida (>250°C). Radnom fluidu RC-318 raste η_u sve do temperature

geotermalnog fluida od 145°C, a zatim počinje padati zbog oblika linije zasićene pare koja je nagnuta prema desno što onemogućava potpunu ekspanziju pare do temperature kondenzacije nego se velika količina osjetne topline odbacuje prije ulaska u kondenzator. Radnom fluidu R-22 η_u raste kontinuirano s porastom temperature geotermalnog fluida, a radnom fluidu R-134a, η_u , počinje padati nakon temperature geotermalnog fluida od 180°C zbog odbacivanja velike količine osjetne topline nakon ekspanzije.

Može se reći da točna temperatura pri kojoj određeni fluid postiže optimalnu učinkovitost ovisi prije svega o kritičnoj temperaturi i funkciji c_p^*/R . Empirijski izraz koji povezuje tu određenu temperaturu i ova dva parametra može se koristiti za određivanje fluida koji će raditi najučinkovitije pri određenoj temperaturi geotermalnog ležišta. Milora i Tester su pretpostavili da postoji korelacija između ovih parametara i optimalne temperature geotermalnog fluida.

Na temelju te pretpostavke napravljene su dvije jednadžbe koje povezuju optimalnu temperaturu geotermalnog ležišta i kritičnu temperature pojedinih fluida u funkciji c_p^*/R -a. Omjer specifičnih toplinskih kapaciteta, γ , je poznata vrijednost za većinu fluida i kao takav predstavlja jednostavan način za izražavanje vrijednosti c_p^*/R -a:

$$T^* - T_C = f\left(\frac{c_p^*}{R}\right) = f\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) \quad (5-20)$$

$$T^* - T_C = \frac{790}{\left(\frac{c_p^*}{R}\right)} = \frac{790}{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)} \quad (5-21)$$

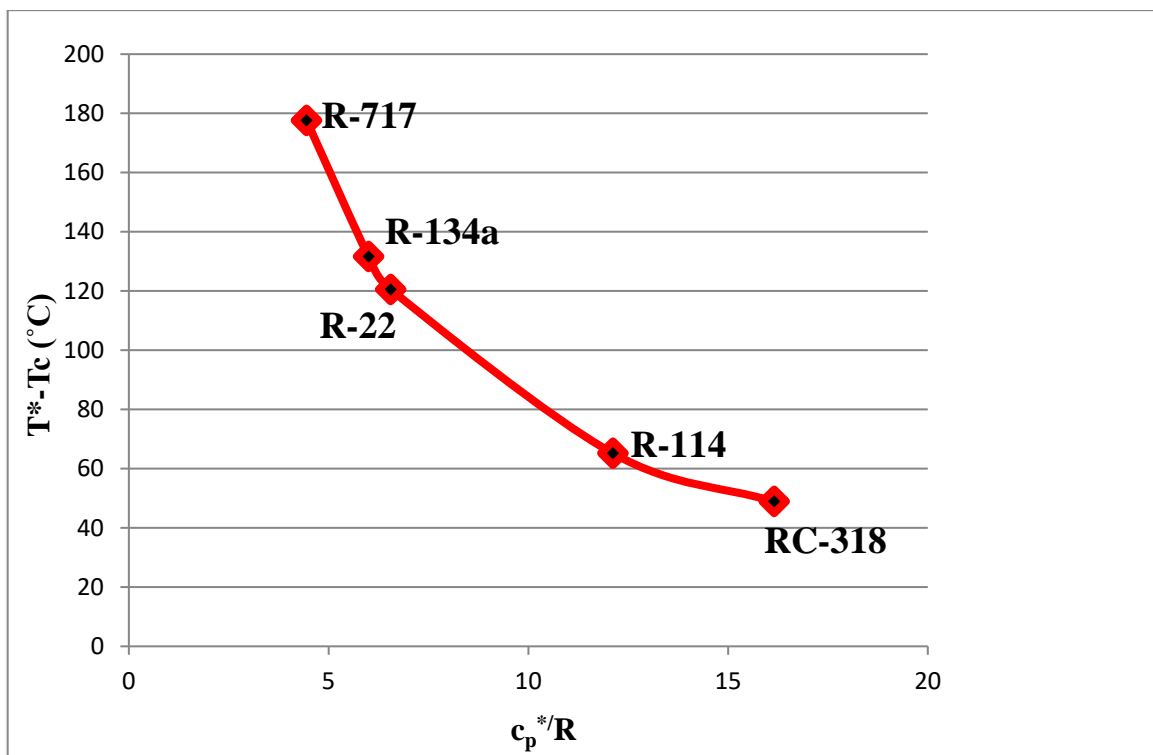
gdje je:

T^* - optimalna temperatura geotermalnog ležišta [°C],

T_C - kritična temperatura radnog fluida [°C],

(c_p^*/R) - specifična toplina stanja idealnog plina,

γ - omjer specifičnog toplinskog kapaciteta pri stalnom tlaku i specifičnog toplinskog kapaciteta pri stalnom volumenu radnog fluida.



Slika 5-12. Korelacija između potrebne količine topline iznad kritične temperature za optimalnu učinkovitost iskorištavanja ležišta i funkcije reducirane specifične topline stanja idealnog plina

Iz Slike 5-12. se može zaključiti da oni spojevi koji su građeni od velikih poliatomskih molekula (γ blizu 1) zahtijevaju jako malo topline iznad kritične temperature kako bi ostvarili optimalnu učinkovitost u nadkritičnim uvjetima rada, dok spojevi jednostavne molekularne građe kao što je R-717 zahtijevaju puno više topline iznad kritične temperature da bi ostvarili optimalnu učinkovitost u nadkritičnim uvjetima. Iz tog razloga, R-717, koji ima nižu kritičnu temperaturu od fluida R-114 i logično bi bilo da pri istoj temperaturi geotermalnog fluida radi učinkovitije od R-114, zbog svoje jednostavne molekularne građe zahtijeva puno više topline odnosno puno veću temperaturu geotermalnog fluida iznad kritične temperature da bi ostvario optimalnu učinkovitost.

U Tablici 5-3. se nalaze podaci određenih komponenti radnih fluida pomoću kojih je izračunata optimalna temperatura geotermalnog fluida za svakog od njih.

Tablica 5-3. Karakteristične vrijednosti određenih komponenti radnih fluida potrebnih za izračun optimalne temperature geotermalnog fluida (Milora i Tester, 1976)

Ime fluida	T_c (°C)	γ	$\gamma/(\gamma-1)$	T*-T_c (°C)	T*(°C)
R-717	133,6	1,29	4,45	177,4	311
R-134a	101	1,20	6	132	233
R-22	96,05	1,18	6,56	121	217
R-114	145,7	1,09	12,11	65	211
RC-318	115	1,066	16,15	49	164

6. IZRAČUN SNAGE ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE NA GEOTERMALNIM POLJIMA VELIKA CIGLENA, REČICA I KUTNJAK UZ PRIMJENU BINARNOG CIKLUSA

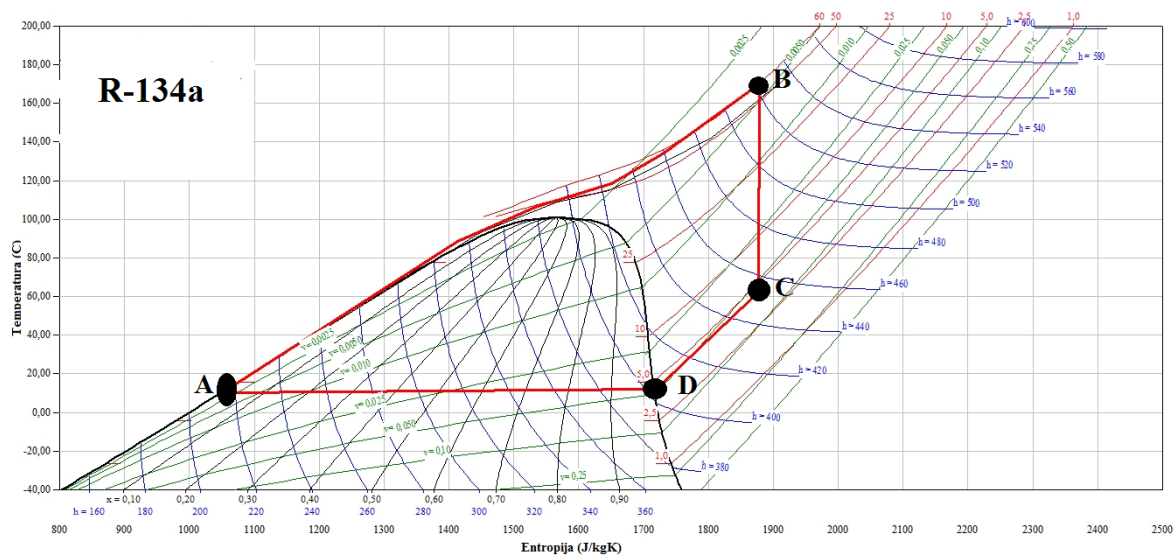
Najvažniji način iskorištavanja visokotemperaturnih geotermalnih izvora je proizvodnja električne energije. Snaga geotermalnih elektrana može varirati od približno 100 kW, uobičajenih vrijednosti od 1 do 5 MW pa sve do vrijednosti od 100 MW u geotermalnim elektranama s “flash” procesom. Izbor tehnologije za iskorištavanje geotermalnog ležišta ovisi o karakteristikama geotermalnog ležišta među kojima su temperatura i protočna svojstva ležišta najvažniji parametri za iskorištavanje geotermalnog potencijala. Razvojem binarnih elektrana omogućeno je iskorištavanje onih geotermalnih ležišta koji nemaju dovoljno visoku temperaturu za generiranje pare koja bi pokretala turbinu za proizvodnju električne energije. Osnovni princip rada ovakve elektrane je prijenos topline sa geotermalnog fluida u izmjenjivaču topline na sekundarni radni fluid s točkom isparavanja nižom od 100°C. Sekundarni fluid isparava i ulazi u turbinu gdje se na generatoru proizvodi električna energija, nakon čega se fluid kondenzira u kondenzatoru uslijed pada temperature te se ponovno vraća u izmjenjivač topline. Pothlađeni geotermalni fluid na izlazu iz izmjenjivača topline utiskuje se natrag u ležište radi održavanja ležišnog tlaka i zaštite okoliša (Milora i Tester, 1976).

6.1. Velika Ciglena

Geotermalno polje Velika Ciglena nalazi se oko osam kilometara jugoistočno od grada Bjelovara, klima je umjereno kontinentalna s prosječnom godišnjom temperaturom od 10,2°C. Geotermalno ležište Velika Ciglena otkriveno je 1990. godine u sklopu istraživanja ugljikovodika, koje je izvodio INA-Naftaplin u Bjelovarskoj depresiji podravske potoline, odnosno, panonskog sedimentnog bazena. Geotermalno ležište Velika Ciglena predstavljeno je debelim karbonatnim pukotinskim kompleksom na dubini 2585-3835 m. Ležište u tektonskom bloku 1 otkriveno je bušotinom VC-1, čiji je cilj bio istraživanje ugljikovodika. Izmjerena ležišna temperature u bušotini VC-1 na dubini 3400 m iznosi 177,6°C, dok je najveća vrijednost temperature 174,6°C vršnog dijela ležišta izmjerena na dubini 2543 m (bušotina VC-1A). Utvrđeni geotermalni gradijent iznosi 6,46°C/100 m.

Neobično visok geotermalni gradijent je posljedica gotovo izjednačene temperature po dubini ležišta. To govori da u ležištu postoji jako konvektivno kruženje, drugim riječima postoji vrlo dobra hidraulička povezanost propusnih zona po cijelom ležištu. Temeljno obilježje ovog područja su visoka ležišna temperatura, izrazita propusnost i pukotinska poroznost trijaskog karbonatnog kompleksa. Protjecanje geotermalne vode u ležištu tektonskog bloka 1 na lokalitetu Velika Ciglena ispitano je obuhvatnije s dvije bušotine, bušotinama VC-1 i VC-1A. Radi toga geotermalnim ležištem smatra se prostor karbonatnih stijena koji će biti obuhvaćen aktivnim protjecanjem u drenažno-utisnom području tih dviju bušotina. Na temelju navedenih proizvodnih ispitivanja i hidrodinamičkih mjerenja predviđeno je crpljenje geotermalnog fluida bušotinom VC-1A. Nakon predaje topline fluidu u sekundarnom krugu, smjesa ohlađene vode i plina CO₂ vratiti će se u ležište kroz bušotinu VC-1 (GeoEn, 2012).

U ovom radu za izračun ukupne snage za proizvodnju električne energije geotermalnog polja Velika Ciglena uz primjenu geotermalne elektrane s binarnim ciklusom koristit će se protok geotermalnog fluida od 80 l/s, temperatura geotermalnog fluida na ušću bušotine od 165°C, temperatura ohlađenog geotermalnog fluida od 75°C, a izbor radnog fluida ovisit će o ukupnom stupnju iskorištenja geotermalnog ležišta u funkciji temperature geotermalnog fluida, η_u , čije su vrijednosti prikazane na Slici 5-11. Kao rashladno sredstvo u kondenzatoru koristiti će se okolni zrak na temperaturi od 10,2°C što je prosječna godišnja temperatura na tom području. Na Slici 6-1. prikazan je Rankineov ciklus radnog fluida R-134a pri uvjetima rada kakvi se nalaze na geotermalnom polju Velika Ciglena.



Slika 6-1. Rankineov ciklus fluida R-134a pri temperaturi geotermalnog fluida 165°C i temperaturi okoline od 10,2°C

U sljedećem proračunu za termodinamičku i ukupnu učinkovitost sustava rad pojne pumpe nije uzet u obzir tako da će rezultati η_{cycle} i η_u biti nešto veći od očekivanih.

Termodinamička učinkovitost:

$$\eta_{cycle} = 1 - \frac{(H_C - H_A)}{(H_B - H_A)} = 1 - \frac{(453 - 215)}{(524 - 215)} = 0,22977 \quad (6-1)$$

Ukupna učinkovitost sustava:

$$\eta_u = \frac{(T_{gin} - T_{gout}) \cdot \eta_{cycle}}{(T_{gin} - T_0) - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T_{gin}}{T_0}\right)} = \frac{(438,15 - 348,15) \cdot 0,22977}{(438,15 - 283,35) - 283,15 \cdot \ln\left(\frac{438,15}{283,35}\right)} = 0,6589 \quad (6-2)$$

$$\eta_u = 65,9\%$$

Bruto snaga binarnog ciklusa:

$$\begin{aligned} P_{bruto} &= q \cdot c_{pgf} \cdot \eta_u \cdot \left(T_{gin} - T_{gout} - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T_{gin}}{T_{gout}}\right) \right) \\ &= 80 \cdot 4,25 \cdot 0,659 \cdot \left(438,15 - 348,15 - 283,15 \cdot \ln\left(\frac{438,15}{348,15}\right) \right) \\ &= 5578 \text{ kWe} \end{aligned} \quad (6-3)$$

Obzirom na internu potrošnju električne energije binarnog postrojenja, potrošnje energije postrojenja za utiskivanje geotermalne vode u ležište, pumpnih stanica i ostalih gubitaka u ciklusu, potrebno je izraziti stvarnu instaliranu neto snagu. Prema pred-investicijskoj studiji kompanije Virkir Orkint Consulting Group Ltd, iz Reykjavika, Island, za naručitelja INA Naftaplin, obavljenoj za ležišta Kutnjak-Lunjkovec i Velika Ciglena 1995. godine, u ovisnosti o karakteristikama ležišta, lokacije i elektrane procijenjeni su sljedeći udjeli interne potrošnje (Kurevija i Golub, 2008), a u Tablici 6-1. izračunate su vrijednosti u kWe.

Tablica 6-1. Interna potrošnja elektrane (Kurevija i Golub, 2008)

	%	kWe
Binarni ciklus	11,36	633,66
Pumpe za utiskivanje	7,95	443,45
Pumpe za toplovod	0,9	50,2
Ostalo	2,5	139,45
Ukupno	22,71	1266,8

Godišnja proizvodnja električne energije (uz pretpostavku godišnjeg stupnja iskorištenja elektrane od 95%):

$$E_{neto} = P_{neto} \cdot \beta = 5578 \cdot (1 - 0,2271) \cdot 8320 \quad (6-4)$$

$$E_{neto} = 35869 \text{ MWh}_e$$

gdje je:

β – godišnji stupanj iskorištenja elektrane [%],

E_{neto} – neto proizvodnja energije [MWh],

P_{bruto} – bruto snaga elektrane [kW].

6.2. Kutnjak-Lunjkovec

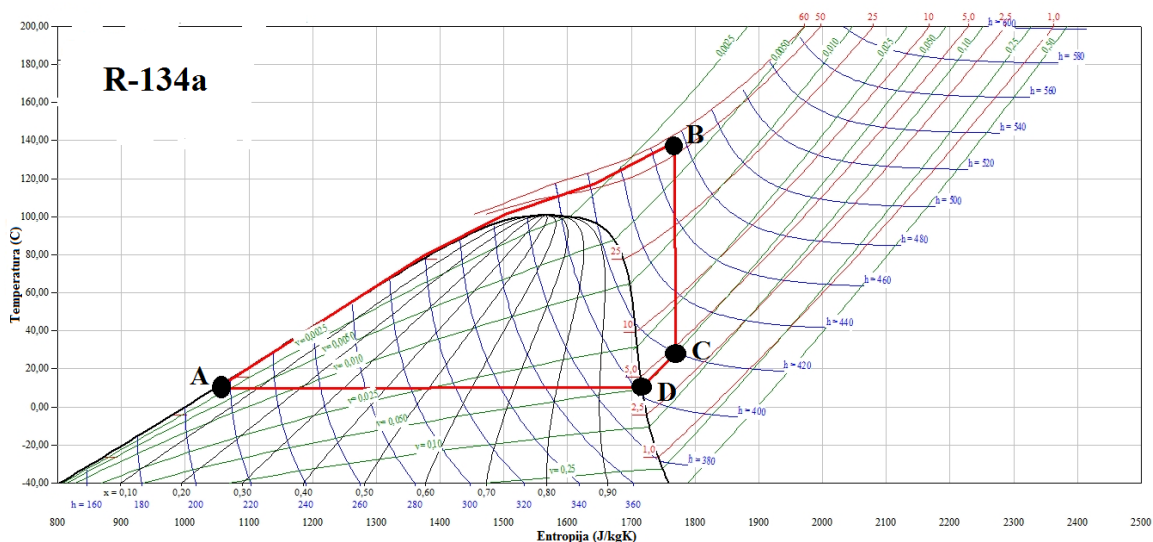
Geotermalni lokalitet Kutnjak-Lunjkovec otkriven je istraživanjem nafte i plina u sjeverozapadnom dijelu istražnog prostora "Drava" u Republici Hrvatskoj. Izrađene bušotine Lunjkovec-1 (Lun-1), Kutnjak-1 (Kt-1) i Kutnjak-2 (Kt-2) te Veliki otok-1 (VOt-1), Veliki Otok-2 (VOt-2) i Veliki Otok-4 (VOt-4) nabušile su stijene karbonatnog sastava koje su glavni kolektor geotermalnih voda i nositelj geotermalne energije. Dosadašnje analize razrade ukazuju na postojanje uvjeta za iskorištavanje geotermalne energije po principu stupnjevanog iskorištavanja od pretvorbe u električnu energiju do zagrijavanja staklenika. Lokalitet Kutnjak-Lunjkovec nalazi se na ravničarskom terenu nadmorske visine oko 140 m, s obradivim, a djelomično i pošumljenim površinama. Manji vodotoci teku prema glavnom prihvatniku regije, rijeci Dravi. Lokalitet je udaljen 100 km od Zagreba i desetak kilometara od grada Koprivnice. Bušotina Kt-1 nalazi se u Koprivničko-križevačkoj županiji, a bušotina Lun-1 u Varaždinskoj županiji. Klima je kontinentalna s prosječnom minimalnom temperaturom od $-1,6^{\circ}\text{C}$ u siječnju i prosječnom maksimalnom $21,7^{\circ}\text{C}$ u srpnju. Prosječna godišnja temperatura je $10,3^{\circ}\text{C}$.

Ležište geotermalne vode nalazi se u karbonatima podloge tercijara i probušeno je sa tri bušotine: Kt-1, Kt-2 i Lun-1. Promjenjiva debljina karbonata je posljedica različitog stupnja izdizanja istaloženih sedimenata i njihove erozije. Vertikalne debljine ležišta kreću se od 100 m (Kt-1) do 225 m (Lun-1). Istočni dio strukture ležišta utvrđen je bušotinskim podacima iz sedam bušotina, dok je zapadni dio riješen na temelju seizmičkih profila. Provedenim testovima interferencije između bušotina Lun-1 i Kt-1, utvrđeno je da u radijusu od 5 km nema barijera kretanju vode prema bušotini zbog čega je ta površina uzeta u račun rezervi jer granice ležišta nisu određene. Jezgrovanja su provedena u bušotinama Lun-1, Kt-1 i Vot-4 te su izrađene mikroskopske analize stijene kojima je utvrđen dolomit i dolomitno-vapnena breča ispresjecana pukotinama ispunjenim kalcitnom supstancom i dolomitnim kršjem. Laboratorijske analize šupljikavosti i propusnosti nisu rađene, međutim, jezgre pokazuju da se radi o stijeni s dvojnim porozitetom, primarnim i sekundarnim. Prosječni geotermalni gradijent za Dravsku potolinu iznosi $51^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Ležište karakterizira visok geotermalni gradijent od $60^{\circ}\text{C}/\text{km}$ i ujednačena temperatura od 130 do 140°C . Geotermijske karakteristike ležišta predstavljaju lokalnu anomaliju koja je posljedica vrlo propusne tektonske zone koja omogućava komunikaciju sa dubljim

masivnim vodonosnikom. Radi se o koncentriranom lokalnom toplinskom dotoku u ležište putem termičke konvekcije (Kurevija i Gregurić, 2008).

Prema fizikalnim karakteristikama stijena, ležište Kutnjak–Lunjkovec pripada srednje temperaturnim ležištima. Proizvodni interval nalazi se na 2 167 m dubine sa statičkim tlakom od 225,6 bar i statičkom temperaturom od 145°C. Proizvodnja geotermalne vode projektirana je kroz prstenasti prostor, između tubinga i zaštitnih cijevi, uz tlak ušća od 6 bar. Iz geotermalnog polja Kutnjak-Lunjkovec energija se može proizvesti kroz dva ciklusa izmjene topline, proizvodnjom električne energije u primarnom krugu i direktnim zagrijavanjem plastenika ili nekog objekta u sekundarnom krugu. U ovom radu obrađen je samo primarni krug u kojem se proizvodi električna energija uz primjenu binarnog ciklusa.

Za proračun snage geotermalnog ležišta uzeti su sljedeći podaci: temperatura geotermalnog fluida na ušću od 140°C, temperatura ohlađenog geotermalnog fluida od 70°C, protok geotermalnog fluida od 70 l/s, kao radni fluid izabran je R-134a jer ima najveću ukupnu učinkovitost sustava pri temperaturi geotermalnog fluida od 140 °C što se može očitati sa Slike 5-11., okolni zrak koristiti će se kao rashladno sredstvo pri temperaturi od 10,3°C. Na Slici 6-2. Prikazan je Rankineov ciklus radnog fluida R-134a pri uvjetima kakvi se nalaze na geotermalnom polju Kutnjak-Lunjkovec.



Slika 6-2. Rankineov ciklus fluida R-134a pri temperaturi geotermalnog fluida 140°C i temperaturi okoline od 10,3°C

U sljedećem proračunu za termodinamičku i ukupnu učinkovitost sustava rad pojne pumpe nije uzet u obzir tako da će rezultati η_{cycle} i η_u biti nešto veći od očekivanih.

Termodinamička učinkovitost:

$$\eta_{cycle} = 1 - \frac{(H_C - H_A)}{(H_B - H_A)} = 1 - \frac{(420 - 214)}{(473 - 214)} = 0,2046 \quad (6-5)$$

Ukupna učinkovitost sustava:

$$\eta_u = \frac{(T_{gin} - T_{gout}) \cdot \eta_{cycle}}{(T_{gin} - T_0) - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T_{gin}}{T_0}\right)} = \frac{(413,15 - 343,15) \cdot 0,2046}{(413,15 - 343,15) - 283,15 \cdot \ln\left(\frac{413,15}{283,15}\right)} = 0,6223 \quad (6-6)$$

$$\eta_u = 62,23 \%$$

Bruto snaga binarnog ciklusa:

$$P_{bruto} = q \cdot c_{pgf} \cdot \eta_u \cdot \left(T_{gin} - T_{gout} - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T_{gin}}{T_{gout}}\right) \right) \quad (6-7)$$

$$= 70 \cdot 4,25 \cdot 0,6223 \cdot \left(413,15 - 343,15 - 283,15 \cdot \ln\left(\frac{413,15}{343,15}\right) \right)$$

$$= 3228 \text{ kW}_e$$

Obzirom na internu potrošnju električne energije binarnog postrojenja, potrošnje energije postrojenja za utiskivanje geotermalne vode u ležište, pumpnih stanica i ostalih gubitaka u ciklusu, potrebno je izraziti stvarnu instaliranu neto snagu. Prema pred-investicijskoj studiji kompanije Virkir Orkint Consulting Group Ltd, iz Reykjavika, Island, za naručitelja INA Naftaplin, obavljenoj za ležišta Kutnjak-Lunjkovec i Velika Ciglena 1995. godine, u ovisnosti o karakteristikama ležišta, lokacije i elektrane procijenjeni su sljedeći udjeli interne potrošnje, a u Tablici 6-2. izračunate su vrijednosti u kW_e.

Tablica 6-2. Interna potrošnja elektrane (Kurevija i Golub, 2008)

	%	kW _e
Binarni ciklus	13,16	424,8
Pumpe za utiskivanje	12,11	390,91
Bušotinske pumpe	2,76	89,1
Pumpe za toplovod	0,79	25,5
Ostalo	1,58	51
Ukupno	30,4	981,31

Godišnja proizvodnja električne energije (uz pretpostavku godišnjeg stupnja iskorištenja elektrane od 95%)

$$E_{neto} = P_{neto} \cdot \beta = 3228 \cdot (1 - 0,304) \cdot 8320 \quad (6-8)$$

$$E_{neto} = 18693 \text{ MWh}_e$$

6.3. Rečica

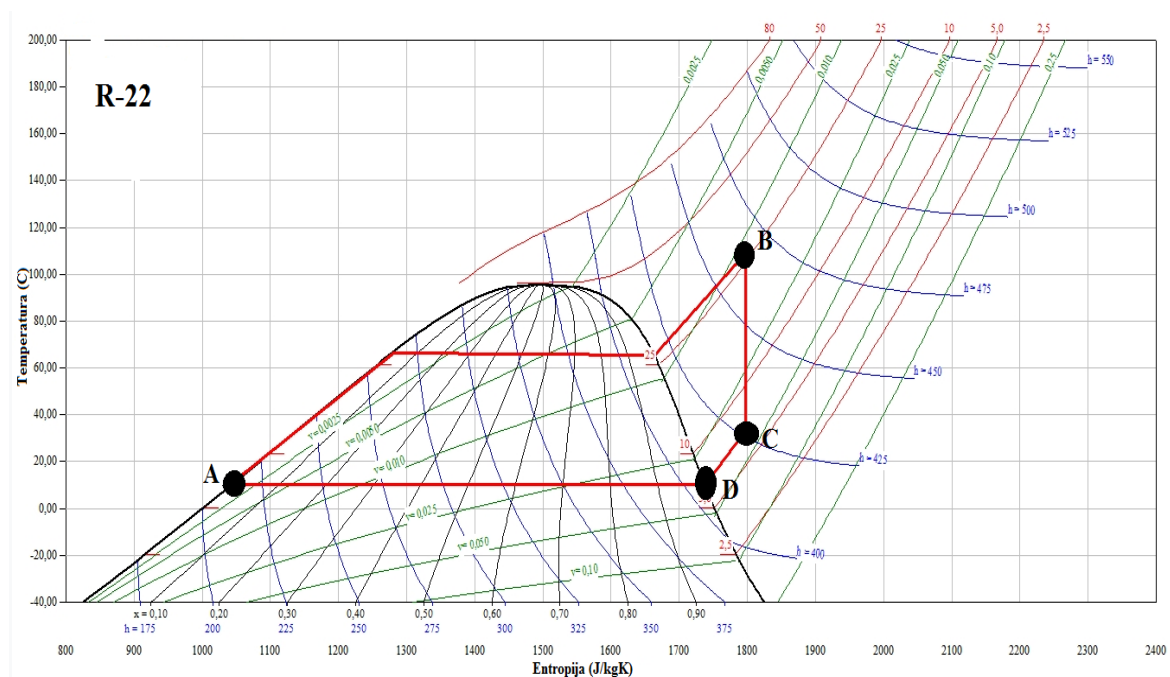
Geološka građa podzemlja Republike Hrvatske uvjetovala je da se geotermalni lokaliteti nalaze uglavnom na području Panonskog bazena. Među te lokalitete, koji se odlikuju temperaturom vode u ležištu višom od 100°C, ubrajaju se i bušotine izrađene na području Karlovca, koje su izrađene s ciljem pronalaska ugljikovodika. Geotermalni lokalitet nalazi se oko 8 km sjeveroistočno od grada Karlovca, a otkriven je 1983. godine bušotinom Ka-2. Kasnije, tijekom 1988. godine, izrađena je bušotina Ka-3, kojom je potvrđen geotermalni potencijal tog lokaliteta. Udaljenost između bušotina Ka-2 i Ka-3 iznosi približno 3 km. Obje bušotine su u vlasništvu Ine. Klima je kontinentalna s prosječnom minimalnom temperaturom u siječnju od -1,0°C i prosječnom maksimalnom temperaturom u srpnju od 23,5°C. Prosječna godišnja temperatura je 11,6°C.

S geološkog stajališta mogu se izdvojiti dva različita kompleksa naslaga koja su različitog geotermalnog potencijala. Kompleks klastičnih naslaga izgrađen je od pješčenjaka, lapora i silta. Salinitet vode u tim naslagama iznosi od 17,5 do 21 g NaCl/dm³ što ukazuje da se radi o slanoj vodi. Premda temperatura vode u tom kompleksu dostiže vrijednost i do 138°C, geotermalni potencijal kompleksa nije velik zbog slabe izdašnosti. Kompleks karbonatnih naslaga nalazi se ispod klastičnih naslaga, zasićen je vodom čiji salinitet iznosi manje od 1 g NaCl/dm³, te se radi o pitkoj vodi. Geotermalni potencijal kompleksa je velik jer se radi o znatno raspucanim naslagama velikog rasprostiranja i debljine. Najviša izmjerena temperatura vode je 140°C. Panonski bazen ima povoljne geotermijske gradijente, a prosječni geotermalni gradijent je $G = 0,049^\circ\text{C/m}$. Geotermalno polje Rečica nalazi se u istražnom prostoru Karlovačke subdepresije. Na bušotini Ka-3 ležišna temperatura procijenjena je prema geotermalnom gradijentu izračunatom iz podataka DST mjerenja. Na dubini od 2511 m temperatura iznosi 120°C.

U cilju otkrivanja ležišta ugljikovodika na širem području grada Karlovca izrađene su ukupno tri bušotine, koje su bile negativne obzirom na ugljikovodike. Od tih bušotina dvije

su pogodne za iskorištavanje geotermalnog ležišta. Predviđeno je da bušotina Ka-3 bude proizvodna, a bušotina Ka-2 utisna. Budući da se radi o ležištu geotermalne vode, koja je obnovljiv izvor energije, planira se vraćanje ohlađene vode natrag u ležište. Na taj način zadovoljit će se uvjet podržavanja ležišnog tlaka, a bit će zadovoljeni i ekološki zahtjevi (Kljaić, 2008).

Na geotermalnom polju Rečica testiran je protok geotermalnog fluida temperature 93°C od 11 l/s . Ugradnjom uronjivih pumpi protok bi se mogao povećati na 20 l/s , a temperatura geotermalnog fluida na 110°C . Za proračun snage geotermalnog ležišta uzeti su sljedeći podaci: temperatura geotermalnog fluida na ušću od 110°C , temperatura ohlađenog geotermalnog fluida od 60°C , protok fluida od 20 l/s , kao radni fluid izabran je R-22 jer ima najveću ukupnu učinkovitost sustava pri temperaturi geotermalnog fluida od 110°C što se može očitati sa Slike 5-11., okolni zrak koristiti će se kao rashladno sredstvo pri temperaturi od $11,6^{\circ}\text{C}$. Na Slici 6-3. prikazan je Rankineov ciklus radnog fluida R-22 pri uvjetima kakvi su na geotermalnom polju Rečica.



Slika 6-3. Rankineov ciklus fluida R-22 pri temperaturi geotermalnog fluida 110°C i temperaturi okoline od $11,6^{\circ}\text{C}$

U sljedećem proračunu za termodinamičku i ukupnu učinkovitost sustava rad pojne pumpe nije uzet u obzir tako da će rezultati η_{cycle} i η_u biti nešto veći od očekivanih.

Termodinamička učinkovitost:

$$\eta_{cycle} = 1 - \frac{(H_C - H_A)}{(H_B - H_A)} = 1 - \frac{(426 - 214)}{(464 - 214)} = 0,152 \quad (6-9)$$

Ukupna učinkovitost sustava :

$$\eta_u = \frac{(T_{gin} - T_{gout}) \cdot \eta_{cycle}}{(T_{gin} - T_0) - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T_{gin}}{T_0}\right)} = \frac{(383,15 - 333,15) \cdot 0,152}{(383,15 - 333,15) - 283,15 \cdot \ln\left(\frac{383,15}{283,15}\right)} = 0,5474 \quad (6-10)$$

$$\eta_u = 54,74\%$$

Bruto snaga binarnog ciklusa:

$$P_{bruto} = q \cdot c_{pgf} \cdot \eta_u \cdot \left(T_{gin} - T_{gout} - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T_{gin}}{T_{gout}}\right) \right) \quad (6-11)$$

$$= 20 \cdot 4,25 \cdot 0,5474 \cdot \left(383,15 - 333,15 - 283,15 \cdot \ln\left(\frac{383,15}{333,15}\right) \right)$$

$$P_{bruto} = 474 \text{ kW}_e$$

Na temelju izračunate snage geotermalnih ležišta Velika Ciglena i Kutnjak-Lunjkovec i njihove interne potrošnje energije elektrane, pretpostavljeno je da će se 20% od ukupno instalirane snage trošiti na internu potrošnju električne energije binarnog ciklusa, potrošnju energije za utiskivanje geotermalne vode u ležište, potrošnju pumpnih stanica pa iz toga slijedi:

$$P_{neto} = P_{bruto} \cdot (1 - 0,2) = 474 \cdot 0,8 = 379,2 \text{ kW}_e \quad (6-12)$$

Godišnja proizvodnja električne energije (uz pretpostavku godišnjeg stupnja iskorištenja elektrane od 95%)

$$E_{neto} = P_{neto} \cdot \beta = 379,2 \cdot 8320 \quad (6-13)$$

$$E_{neto} = 3154 \text{ MWh}_e$$

7. GEOTERMALNI POTENCIJAL PLINSKIH I PLINSKO KONDENZATNIH LEŽIŠTA U HRVATSKOJ

Većina plinskih i plinsko kondenzatnih polja u sjevernom djelu Hrvatske su u kasnom stadiju proizvodnje s velikim udjelom slojne vode, visokom slanosti akvifera i često s visokim sadržajem CO₂. Kada proizvodnja plina na tim poljima postane ekonomski neisplativa moguće je prenamijeniti proizvodne plinske bušotine u geotermalne. U početnoj fazi proizvodnje primarni proizvod je plin, a geotermalna voda sekundarni. U kasnijem stadiju proizvodnje kada tlak u ležištu pada i kad se granica voda-plin pomiče gore, geotermalna voda se proizvodi s malim sadržajem plina (Kurevija i Vulin, 2011). U ovom stadiju proizvodnje, geotermalna voda se može proizvesti i koristiti za zagrijavanje radnog fluida u geotermalnim elektranama s binarnim ciklusom. Molve, Kalinovac i Stari Gradac su tri polja odabrana za daljnju analizu geotermalnog potencijala plinskih i plinsko kondenzatnih polja u kasnom stadiju proizvodnje. U proračun snage ova tri polja pretpostavljen je protok geotermalnog fluida od 50 l/s i temperatura geotermalnog fluida na izlazu iz izmjenjivača topline od 80°C. Temperatura geotermalnog fluida u ležištu na polju Molve je 190°C, na polju Kalinovac 185°C, i na polju Stari Gradac 200°C. Geotermalna elektrana s binarnim ciklusom odabrana je kao najučinkovitije postrojenje za proizvodnju električne energije iz ova 3 polja. U Tablici 7-1. nalaze se podatci korišteni za izračun bruto snage spomenutih ležišta.

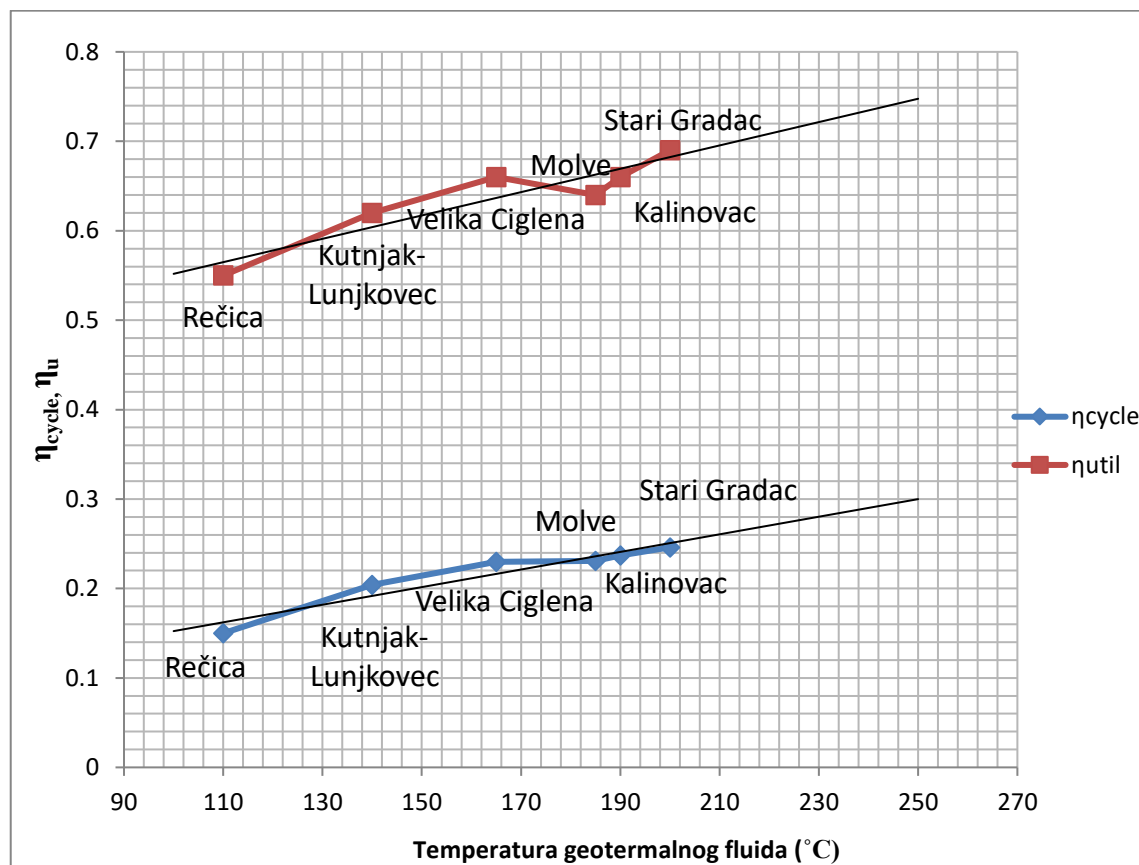
Tablica 7-1. Podatci o ključnim veličinama za izračun snage geotermalnih ležišta

Polje	Molve	Kalinovac	Stari Gradac
Temperatura ležišta (°C)	190	185	200
Temperatura utisnutog geotermalnog fluida(°C)	80	80	80
Temperatura okoline (°C)	12	12	12
Protok geotermalnog fluida (l/s)	50	50	50
Radni fluid	R-134a	R-134a	R-22
η_{cycle}	0,237	0,231	0,246
η_u	0,657	0,643	0,678
Bruto snaga (kWe)	4559	4203	5273

8. ZAKLJUČAK

Geotermalna energija je najperspektivniji obnovljiv izvor energije jer je dostupna 24 sata na dan i ima je u velikim količinama u cijelom svijetu, ali uz današnje stanje tehnologije i cijene konkurentnih izvora energije nije isplativa u većini slučajeva. Proizvodnja električne energije iz geotermalnih izvora u svijetu se koristi uglavnom na područjima gdje je temperatura geotermalnog fluida dovoljno visoka za generiranje pare. U onim ležištima gdje su temperature nedovoljno visoke za izravno generiranje pare može se koristiti binarni sustav s ORC ciklusom. Razvojem geotermalnih elektrana s binarnim ciklusom omogućeno je bolje korištenje toplinske energije geotermalnog ležišta pri proizvodnji električne energije. Osnovni princip rada ovakve elektrane je prijenos topline sa geotermalnog fluida u izmjenjivaču topline na sekundarni radni fluid s točkom isparavanja nižom od 100°C. U ovom radu ispitan je rad 5 različitih fluida pri temperaturama geotermalnog fluida od 100-200°C i rezultati pokazuju da se uz pravilan izbor radnog fluida u geotermalnim elektranama s binarnim ciklusom može ostvariti relativno visoka učinkovitost rada elektrane. Koji će se radni fluid koristiti u elektrani ponajviše ovisi o temperaturi geotermalnog fluida, kritičnom tlaku i kritičnoj temperaturi radnog fluida i obliku linije zasićene pare radnog fluida. Fluidi R-22 i R-134a najbolji su izbor pri rasponu temperatura geotermalnog fluida 100-200°C. U radu je napravljen izračun za snagu proizvodnje električne energije uz primjenu binarnog ciklusa za tri geotermalna polja u Hrvatskoj, Velika Ciglena, Kutnjak-Lunjkovec i Rečica. Proporcionalno s rastom temperature geotermalnog ležišta raste i snaga spomenutih polja među kojima Velika Ciglena pokazuje najveći potencijal s temperaturom geotermalnog ležišta od 170°C. Globalno zatopljenje jedan je od najvećih problema s kojim se cijeli svijet suočava. Izgaranje fosilnih izvora energije koji ispuštaju stakleničke plinove glavni je uzrok globalnom zatopljenju. Fosilni izvori energije imaju svoj rok potrošnje i svijet se treba polako okretati obnovljivim izvorima energije. Razvojem binarnih geotermalnih elektrana s ORC ciklusom moguća je proizvodnja električne energije iz nisko i srednje temperaturnih ležišta što do sada nije bio slučaj. Povećanjem udjela geotermalnih izvora energije za proizvodnju električne energije smanjit će se ovisnost Hrvatske o uvozu energije, povećat će se energetska sigurnost i smanjiti emisija stakleničkih plinova. U Hrvatskoj postoji određeni broj polja koja su proizvodila ugljikovodike pa su zbog nerentabilnosti zatvorene ili još proizvode, ali na granici isplativosti. Bušotine na tim poljima u kojima je temperatura ležišta iznad 100°C mogu biti prenamijenjene u geotermalne iz kojih bi se uz

primjenu binarnih elektrana s ORC ciklusom proizvodila električna energija. U ovom radu obrađena su tri takva polja: Molve, Kalinovac i Stari Gradac. Iz dobivenih rezultata koji pokazuju visoke stupnjeve iskorištenja ležišta, a time i veliku snagu za proizvodnju električne energije, postavlja se pitanje zašto se bušotine na tim poljima ne iskorištavaju za proizvodnju električne energije nego se uvozi skuplja električna energija. Grafički prikaz učinkovitosti iskorištavanja polja obrađenih u poglavljima 6 i 7 prikazan je na Slici 8-1.



Slika 8-1. Učinkovitost iskorištavanja ležišta u ovisnosti o temperaturi geotermalnog fluida

9. POPIS LITERATURE

1. CHANDRASEKHARAM, D., BUNDSCHUH, J., 2008. Low enthalpy geothermal resources for power generation, Leiden: CRC Press/Balkema.
2. CHIASSON, A., 2016., Geothermal heat pump and heat engine systems, Department of mechanical and aerospace engineering, UK: John Wiley&Sons.
3. DICKSON, M., FANELLI, M., 1995. Geothermal energy: utilization and technology, Pariz: John Wiley&Sons.
4. DIPIPO, R., 2012. Geothermal power plants: principles, applications, case studies and enviromental impact 3rd edition, UK: Elsevier advanced technology.
5. EUROBSERVER, 2016. The state of renewable energies in Europe, Annual Overview.
6. GEOEN, 2012., Rudarski projekt za eksploataciju geotermalnog fluida na eksploatacijskom polju Velika Ciglena.
7. GOLUB, M., KUREVIJA, T., KOŠČAK-KOLIN, S., 2004. Thermodynamic cycle optimization in the geothermal energy production, Zagreb: Rudarsko geološko naftni fakultet.
8. GOSWAMI, D. , 2010., A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
9. GUPTA, H., ROY, S., 2007., Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century, Amsterdam: Elsevier B.V.
10. KUREVIJA, T., GOLUB, M., 2008. Iskorištavanje geotermijskih ležišta, Zagreb: Rudarsko geološko naftni fakultet.
11. KUREVIJA, T. , GREGURIĆ, M., 2008., Eksergetska snaga binarnog Rankine ciklusa ne geotermalnom ležištu Kutnjak-Lunjkovec, Goriva i maziva, str. 20-33.
12. KUREVIJA, T. , VULIN, D., 2011., High enthalpy geothermal potential of the deep gas fields in central Drava basin, Water Resources Management, str. 1-13.
13. KLJAIĆ, Ž., 2008. Poslovni plan geotermalnog polja Rečica, Zagreb: Rudarsko geološko naftni fakultet.
14. MILORA, S. L., TESTER, J. W., 1976. Geothermal energy as a source of electric power, The MIT Press, New York.
15. PARADA, A. , 2013., Geothermal binary cycle power plant principles, operation and maintenance, Geothermal training programme, Reykjavik.

16. STOBER, I., BUCHER, K., 2013. Geothermal energy, From theoretical models to exploration and development, Berlin: Springer Heidelberg.
17. VALDIMARSSON, P. , 2011., Geothermal power plant cycles and main components, Santa Tecla, El Salvador, Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants, 16-22 January 2011.
18. WILLIAMS, C. F., REED, M. J., ANDERSON, A. F., 2011. Updating the classification of geothermal resources, Stanford University.

IZJAVA

Ovom izjavom izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom.

Diego Longin